



HAL
open science

Optimisation de la formation des pilotes par l'éducation du comportement oculaire

Emilien Dubois

► **To cite this version:**

Emilien Dubois. Optimisation de la formation des pilotes par l'éducation du comportement oculaire. Interface homme-machine [cs.HC]. Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, 2017. Français. NNT: . tel-02917493

HAL Id: tel-02917493

<https://theses.hal.science/tel-02917493>

Submitted on 19 Aug 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace

Présentée et soutenue par :

Emilien DUBOIS

le vendredi 17 novembre 2017

Titre :

Optimisation de la formation des pilotes par l'éducation du comportement
oculaire

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED AA : Neurosciences, comportement et cognition, Informatique

Unité de recherche :

Hors équipe d'accueil ISAE-ONERA et ICA, précisez : ENAC/DEVI et CReA

Directeur(s) de Thèse :

M. Christophe HURTER (directeur de thèse)

M. Cyril CAMACHON (co-directeur de thèse)

Jury :

M. Bernard CLAVERIE Professeur Institut Polytechnique de Bordeaux - Président, Rapporteur

Mme Nathalie BONNARDEL Professeur Université Aix-Marseille - Rapporteur

M. Cyril CAMACHON Enseignant-chercheur Ecole de l'Air - Co-directeur de thèse

M. Mickaël CAUSSE Ingénieur-chercheur ISAE-SUPAERO

M. Christophe HURTER Professeur ENAC - Directeur de thèse

M. Francis JAMBON Maître de Conférences Université Grenoble Alpes



« L'œil ne voit que ce que l'esprit est prêt à comprendre. »

Henri Bergson

Remerciements

Alors que rien n'aurait pu prédire le cheminement que j'ai suivi durant ces années d'études, la réalisation de cette thèse vient clôturer ce parcours aussi sinueux qu'original. Cette thèse a été un moment privilégié durant lequel j'ai eu la chance de croiser, côtoyer et collaborer avec des personnes d'horizons bien différents auprès desquelles j'ai beaucoup appris. Je tiens ici à remercier toutes ces personnes qui m'ont, de près ou de loin, encadré, poussé, encouragé, aidé ou « juste » permis de tenir durant ces trois années de labeur :

- Christophe Hurter, directeur de thèse, qui a initié ce projet de thèse en collaboration entre l'ENAC et le CReA, sans qui rien ne se serait passé et qui a su trouver les mots pour me permettre de me surpasser ;
- Cyril Camachon, codirecteur de thèse, pour avoir cru en moi et pour avoir passé des heures innombrables à réfléchir à la meilleure manière de me guider. Son encadrement restera un modèle de responsabilisation et de rigueur dont je compte bien m'inspirer dans mes futures expériences. Je suis bien conscient de la chance que j'ai eu de travailler à ses côtés ;

- Pierre Barbaroux, Colin Blättler, Ludovic Fabre, Vincent Ferrari, Anne-Lise Marchand, Christophe Pajon, Agnès Santori, enseignants-chercheurs du CReA, qui ont su me faire une petite place parmi eux et dont les nombreux échanges ont été tous plus enrichissants les uns que les autres ;
- Mickaël Causse, professeur à l'ISAE, pour les cours qu'il a dispensés à ma promotion du master IHM. Ils m'ont donné envie d'aller plus loin dans les études ;
- Yves Auffret, Thomas Marcouf, Camille Trotoux, Gregory Froger, doctorants au CReA et compagnons de galère, avec qui j'ai partagé des moments difficiles et stimulants mais toujours amicaux ;
- Daniel Gigan, Magalie Deveyer, Karim Rached, collègues du CED, qui ont suivi et soutenu ce projet à leur manière, toujours amicalement et avec bienveillance ;
- Laurence Porte, Liza Moisand, Maureen Pauchard, bibliothécaires de l'ENAC, qui m'ont épaulé dans la récupération des articles-clés de ce travail de recherche, avec réactivité et gentillesse ;
- Céline Ramond, et Aurélie Peillon, pour avoir pris le temps de relire des parties de mon manuscrit et avoir inlassablement proposé de m'aider ;
- Marie-Françoise et Michel Dubois, mes parents, pour leur soutien sans faille durant ces trois ans loin de la région Toulousaine et pour leurs nombreuses relectures réalisées avec réactivité et application ;
- Amandine Dubois et Clément Rolland, pour m'avoir permis de voir grandir mon neveu malgré la distance et les contraintes de chacun. Il n'y avait pas plus belle évasion à ma thèse que ce petit Charlie ;
- Mam, ma grand-mère, pour son indéfectible affection ... et pour ses bons gâteaux ;
- Papou, mon grand-père, qui est toujours un modèle pour moi. Il aurait été fier de mon parcours ;

- Maxime Rolland, pour avoir partagé ces trois ans inoubliables de colocation aux Marettes et Gauthier Le Plaine pour avoir animé les six derniers mois ;
- Mathieu Sayen et Romain Lechien, pour avoir particulièrement œuvré à conserver notre amitié malgré la distance, et d’avoir toujours répondu présent, et m’avoir gardé une place à Toulouse ;
- Tous les doctorants de l’ONERA Salon-de-Provence, pour les parties de sports, les échanges de bons procédés (participants) et les moments de décompressions bien sympathiques.

Les productions de thèse

Article à comité de lecture

Froger, G., Blättler, C., Dubois, E., Camachon, C., & Bonnardel, N. (Soumis). Time interval emphasis in dual task aeronautical context: A countermeasure to distraction. *Human Factors*.

Dubois, E., Camachon, C., & Hurter, C. (Soumis). PiGaT (PilotGazeTrainer): Visual Strategies Training Tool. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*.

Camachon, C., Dubois, E., & Hurter, C. (en préparation). Gaze behavior analysis of French military pilots at different levels of experience: the setting of clear objectives for the training of the pilots' visual skills

Camachon, C., Dubois, E., & Hurter, C. (en préparation). Educating gaze behavior in a dynamic and complex situation: a new way to enhance the development of adaptive expertise.

Actes de congrès internationaux à comité de lecture

Dubois, E., Camachon, C., Blättler, C., & Hurter, C. (2016). Evaluation du dispositif PiGaT pour l'entraînement des stratégies visuelles d'élèves pilotes. In *Actes de la 28ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine* (p. 117-187). Fribourg, Switzerland. ACM.

Dubois, E., Blättler, C., Camachon, C., & Hurter, C. (2015). Eye Movements Data Processing for Ab Initio Military Pilot Training. In *Intelligent Decision Technologies* (p. 125-135). London, UK: Springer International Publishing.

Actes de congrès nationaux à comité de lecture

Froger, G., Blättler, C., Dubois, E., Camachon, C., & Bonnardel, N. (2017). L'apprentissage d'un séquençage visuo-attentionnel pour lutter contre la distraction en contexte aéronautique de double tâche. 9ème conférence de Psychologie Ergonomique (EPIQUE), Dijon.

Table des matières

Les productions de thèse	6
Introduction générale	10
Partie I Le contexte théorique	23
Chapitre 1 Pilotage et Éducation du comportement oculaire.....	24
1.1 De la situation à l'activité de pilotage.....	25
1.2 Du comportement oculaire à l'éducation du comportement oculaire	27
Chapitre 2 Application de la démarche d'éducation du comportement oculaire au contexte du pilotage	52
2.1 Etape 1 : la modélisation du comportement de référence.....	52
2.2 Etape 2 : L'utilisation d'une nouvelle méthode d'éducation du comportement oculaire.....	61
2.3 Etape 3 : L'évaluation des bénéfices de notre méthode d'éducation du comportement oculaire.....	84
Rappel & Synthèse de la problématique de thèse	87

Partie II Méthodologie, Développement & Validation	91
Chapitre 3 Présentation des environnements expérimentaux et des dispositifs d'eye tracking	92
3.1 Présentation du simulateur de Cirrus© SR20	92
3.2 Présentation du micromonde AbstractFlyingTask (AFT)	94
3.3 Les dispositifs d'eye tracking.....	108
3.4 Scénario PiGaT d'amélioration de la surveillance du ciel	110
Chapitre 4 Validations expérimentales : des vérifications essentielles.....	113
4.1 Expérimentation 1 : La viabilité technique du PiGaT sur simulateur	113
4.2 Expérimentation 2 : L'évaluation de la méthode d'éducation du comportement oculaire sur le micromonde AFT.....	119
4.3 Conclusions des validations expérimentales.....	130
Partie III Expérimentations	132
Chapitre 5 Evaluation des bénéfices apportés par notre nouvelle méthode d'éducation.....	133
5.1 Introduction.....	133
5.2 Méthode.....	138
5.3 Résultats.....	145
5.4 Discussion.....	153
5.5 Conclusion.....	156
Chapitre 6 Comportement oculaire et performance à différents stades de la formation des pilotes militaires	158
6.1 Introduction.....	158
6.2 La découpe en phases des virages	160
6.3 Méthode.....	163

6.4	Résultats	166
6.5	Discussion	174
6.6	Conclusion	177
Partie IV Conclusion & Perspectives		178
Conclusions des recherches menées		179
Perspectives		184
Références bibliographiques		187
Table des illustrations		198
Annexes.....		202

Introduction générale

Voler n'est pas une activité naturelle pour l'Homme. Pour ce faire, il a conçu des machines capables de le maintenir temporairement en l'air. Dès la fin du XIXe siècle les premiers prototypes fonctionnels voient le jour avec notamment *l'Avion III* de Clément Ader (1897) et le *Flyer* des frères Wright (1903). Ces inventions intéressent particulièrement les forces armées comme en témoigne le financement obtenu du ministre de la guerre en 1892 par Clément Ader. En France, l'armée s'organise rapidement après les premiers exploits de vol et crée un nouvel organe entièrement aéronautique dès 1910. Au début de l'année suivante, le Général Roques institue le premier brevet de pilote militaire qui se veut exigeant par rapport aux formations de l'époque. Avec la première guerre mondiale, l'aéronautique fait ses preuves et entérine son utilité ainsi que la nécessité d'organiser son utilisation. Le 1er avril 1933, un décret interministériel donne naissance à l'Armée de l'air et un an plus tard (2 juillet 1934) un projet de création d'une école de pilotage est voté par l'Assemblée.

Avec la maturité et la puissance grandissante, ces avions embarquent de plus en plus de capteurs et complexifient l'activité de pilotage. Ces formations permettent de professionnaliser les pilotes de manière rigoureuse et organisée afin de les préparer au mieux aux situations périlleuses qu'ils s'apprêtent à rencontrer.

La formation de pilotage dispensée par l'Armée de l'air française est ainsi un symbole d'exigence et de rigueur. La sélection des aviateurs est une problématique qui apparaît très rapidement. Une première sélection permet de constituer la promotion d'élèves-pilotes qui recevra ensuite l'enseignement au pilotage. En 1935, la première promotion, du nom du prestigieux aviateur Guynemer (1894-1917), comprend 50 candidats sélectionnés. Pour autant, tous n'iront pas jusqu'au bout de la formation. En effet, des épreuves et des notations permettent d'éliminer les candidats dont la progression se révélerait, finalement, non-suffisante. Le pilotage d'avion est une activité complexe et difficile qui doit être réalisée correctement sous peine de conséquences tragiques. Alors que les difficultés techniques sont progressivement gommées par les améliorations des aéronefs, les difficultés liées à l'activité de pilotage sont de plus en plus identifiées et documentées. Des programmes de recherche s'y intéressent désormais de près.

Au début des années 1990, Gopher, Weil et Bareket (1994) ont récupéré, dans le cadre d'une étude, les témoignages des instructeurs de l'Armée de l'air israélienne au sujet des principales raisons d'élimination des candidats. Les résultats ont montré que la mauvaise gestion de la situation ou de la charge mentale étaient les raisons les plus fréquemment mentionnées. Une des composantes principales de cette gestion de la situation est le circuit visuel. En effet, les informations présentes dans la situation de pilotage sont principalement visuelles et la mauvaise perception de ces informations serait à l'origine de la majorité des erreurs faites par les pilotes (Jones & Endsley, 1996). Cela montre qu'une des difficultés principales réside dans la faculté à récupérer correctement ces informations visuelles et à les traiter.

Initialement, les avions étaient équipés de cockpits dits 'analogiques' (figure 1a) où les informations étaient toutes séparées dans différents cadrans. Au fil du temps, des circuits visuels ont été identifiés comme pertinents et servaient d'outils d'enseignement visant à améliorer la récupération des informations par le regard. Par exemple, pour les vols aux instruments (IFR, gestion du vol sans regarder dehors, juste à l'aide des instruments), le "T basique" était notamment enseigné. Ce circuit visuel en T correspond à un séquençage des différents cadrans du cockpit devant être vus afin d'obtenir une bonne conscience de la situation de l'avion puisqu'aucun élément extérieur n'était visible. Le principe de ce circuit visuel était de toujours repasser par l'instrument affichant l'attitude de l'avion (assiette et inclinaison) avant de regarder la vitesse, l'altitude ou le cap. De fait, réaliser ce circuit visuel revenait à dessiner un T avec ses yeux sur les instruments, d'où sa dénomination.



Figure 1 - Cockpit analogique (a) vs *glass cockpit* (b)

Le circuit visuel serait à la base de l'acquisition d'une bonne conscience de la situation car c'est pour le pilote, le moyen de récupérer la majorité des informations. La conscience de la situation ou *situation awareness* peut être définie par (1) la perception des éléments de l'environnement dans un volume de temps et d'espace, (2) la compréhension de leur signification et (3) la projection de leur statut dans un futur proche (Endsley & Garland, 2000). En effet, pour gérer au mieux l'avion dans les différentes situations qu'il est amené à rencontrer, il faut avoir conscience à tout instant de l'attitude de l'avion, de ses capacités et des marges de manœuvres que

l'environnement permet. Une bonne conscience de la situation soutient une prise de décision prenant en compte toutes les composantes de la situation et est souvent le support d'un choix d'actions pertinent (Wickens, 2002). Le circuit visuel d'un individu est d'ailleurs un bon indicateur objectif de sa conscience de la situation. Van de Merwe, Van Dijk et Zon, (2012) ont réalisé une expérimentation visant à évaluer le lien entre les mouvements des yeux et la conscience de la situation des pilotes lors de vols en simulateur. Les résultats ont montré que certaines caractéristiques du comportement oculaire (*e.g.* fixations du regard) étaient effectivement pertinentes pour évaluer la conscience de la situation des pilotes.

Les raisons d'élimination de candidats récoltées en 1994 dans l'étude de Gopher *et al.* montrent que, sur des cockpits analogiques, les élèves n'avaient pas toujours une conscience de la situation suffisante pour gérer correctement leurs vols. Cela met en évidence une difficulté à construire un comportement oculaire efficace dans cet environnement complexe. Cette difficulté s'est vue encore renforcée avec l'arrivée de cockpits plus modernes. En effet, l'aviation légère généralement utilisée en début de formation a vu peu à peu arriver de nouveaux cockpits souvent appelés *glass cockpits* car ils ont la particularité d'être composés d'affichages numériques. Sur ce type d'avions, les cockpits modernes sont composés de deux écrans LCD remplaçant les traditionnels cadrans : le PFD pour l'affichage des informations primaires de vol (Primary Flight Display) et le MFD pour les différentes tâches de gestion de système (MultiFunction Display) (figure 1b). Ces cockpits ont apporté un changement dans l'affichage des informations primaires de vol, ainsi que de nouvelles fonctionnalités devant toutes être gérées par le pilote. Dès lors, l'activité de pilotage s'en est trouvée modifiée, de même que certaines connaissances spécifiques aux cockpits traditionnels. Par exemple le circuit visuel standard en "T" préconisé pour le vol aux instruments sur les cockpits analogiques a été remis en cause et aucune autre stratégie n'a été documentée pour le remplacer (Mumaw, Starter et Wickens, 2001).

Ainsi sur ces nouveaux cockpits, les pilotes développeraient par leurs propres moyens des stratégies de récupération des informations qui ne sont pas forcément optimales. Effectivement, dans des situations impliquant une forte charge cognitive, si les personnes ne sont pas guidées, l'expérience qu'elles développent par essais-erreurs semble les mener à des stratégies sous-optimales qui seront difficiles à modifier par la suite (Gopher *et al.*, 1994 ; Foss, Fabiani, Mané & Donchin, 1989). Le pilotage, et particulièrement le pilotage militaire, est par nature une situation qui demande beaucoup de ressources aux pilotes. Il est donc possible que les comportements oculaires développés par les pilotes ne soient pas optimaux. C'est ce qu'ont notamment montré Colvin, Dodhia et Dismuke (2005) dans leur étude visant à vérifier si les pilotes avaient un comportement oculaire adéquat pour voir et éviter des collisions entre aéronefs. Dans cette étude les auteurs se sont intéressés à la surveillance du ciel en vol à vue (VFR) en simulateur. Pour voir et éviter les dangers extérieurs, les autorités aéronautiques préconisent de regarder environ 70% du temps à l'extérieur de l'avion (FAA, 1998). Pourtant, les résultats obtenus ont montré que même les pilotes expérimentés ne respectent pas les standards de sécurité donnés par les autorités et regardent trop les instruments. Ce problème communément appelé "*too much head-down time*" illustre bien la difficulté de développer un circuit visuel optimal dans cette situation.

L'introduction de ces *glass cockpits* a ainsi généré un certain nombre d'écueils, recensés dans différentes revues (voir celle de Funk *et al.*, 1999) : comme par exemple des problèmes de lisibilité des informations affichées. Mais un des aspects les plus préoccupants dans notre contexte est le fait que ces cockpits rendraient l'apprentissage initial du pilotage plus compliqué.

Wright et O'Hare (2015) ont réalisé une expérimentation avec une soixantaine de personnes n'ayant jamais piloté. Ces personnes ont reçu un entraînement initial au pilotage sur simulateur à l'aide d'un cockpit analogique pour la moitié d'entre elles, ou d'un *glass cockpit* pour l'autre moitié. A la suite de cet entraînement, la performance de vol (nombre de crashes au décollage, déviation d'altitude, déviation

de vitesse et déviation de cap) a été mesurée pour chaque personne lors d'un vol simulé soit sur le même cockpit que celui utilisé durant l'entraînement, soit sur l'autre type de cockpit. Les résultats montrent que les personnes qui ont réalisé cette post-évaluation sur un *glass cockpit* obtiennent des performances significativement plus faibles que leurs homologues sur cockpits traditionnels. De plus, les personnes ayant réalisé l'entraînement et la post-évaluation sur un *glass cockpit* ont eu plus de difficultés à maintenir le cap lors des descentes. Cela s'est traduit par une déviation du cap significativement plus grande durant ces manœuvres. Cette difficulté semble avoir été gommée chez les personnes entraînées sur un *glass cockpit* mais évaluées sur un cockpit traditionnel. Paradoxalement, les résultats des questionnaires renseignés à la fin des vols montrent une préférence nette des participants pour les *glass cockpits* sur tous les aspects évalués (*i.e.* efficacité d'utilisation, facilité de lecture des instruments). Dans cette étude, les contraintes de l'entraînement telles que le temps restreint sont citées par les auteurs comme explications potentielles de cette difficulté d'apprentissage sur les *glass cockpits*. En résumé, l'étude indique que ce sont les enseignements soutenant l'apprentissage du pilotage qui doivent être revus. C'est une problématique qui avait également été identifiée par les autorités de sûreté aérienne américaines (*i.e.* Federal Aviation Administration, FAA). En effet, l'arrivée des *glass cockpits* dans l'aviation générale américaine était censée améliorer la sécurité des vols. Mais le taux d'accidents et autres indicateurs n'ont pas révélé de réelle amélioration. C'est pourquoi dès 2003, la FAA a lancé le programme de recherche nommé *FAA/Industry Training Standards (FITS)* dont un des objectifs était de comprendre comment les nouvelles technologies présentes dans les cockpits modernes étaient liées aux accidents impliquant ce type d'avions (Fiduccia *et al.*, 2003). Les premiers éléments issus de ces recherches mettent en avant que l'avionique moderne des *glass cockpits* implique une remise en question profonde de la manière de piloter et par conséquent d'apprendre à piloter. Ces travaux soulignent également que la formation sur les avions classiques (cockpits traditionnels) n'est pas adaptée aux défis amenés par les cockpits modernes. Ces conclusions ont débouché sur la conception d'un nouveau

syllabus de formation spécifique à ces nouveaux environnements. Malgré cela, l'étude de Wright et O'Hare réalisée en 2015 montre que ces difficultés sont encore d'actualité.

Dès 2012, l'Armée de l'air française a acquis une flotte d'avions plus modernes équipés de *glass cockpits*, les Cirrus SR20, pour la phase initiale de formation se déroulant à Salon-de-Provence sur la base aérienne 701. Depuis cette date, les promotions d'élèves ainsi que les instructeurs de l'Armée de l'air ont été concernés par ce changement vers le tout numérique. Cela a, sans surprise, posé quelques problèmes similaires à ce qui avait été observé par ailleurs (Funk *et al.* 1999). Les retours d'expérience des instructeurs de Salon-de-Provence, suite à ce changement d'environnement de travail, relataient fréquemment des difficultés dont notamment, le problème précédemment cité de la surveillance du ciel. En effet, les élèves pilotes seraient, selon les instructeurs, « encore plus qu'avant », attirés par les instruments et passeraient trop peu de temps à surveiller le ciel pour voir et éviter les dangers extérieurs. Pour un instructeur, arriver à savoir où l'élève pilote regarde est une tâche ardue qui nécessite qu'il se focalise sur cet aspect du vol au détriment du reste. Lorsque les avions étaient équipés de cockpits traditionnels les instructeurs pouvaient *déduire* l'endroit regardé par l'élève en observant les mouvements de sa tête. En effet, cette démarche était rendue possible par l'espacement des cadrans sur le tableau de bord. Avec les *glass cockpits*, les informations de vol sont concentrées au même endroit (sur l'écran du PFD) ce qui rend encore plus difficile et coûteuse cette démarche. En pratique, cette surveillance fine du comportement oculaire de l'élève n'est pas faisable ou de manière très ponctuelle. C'est pourquoi, généralement, les instructeurs ne peuvent repérer un mauvais comportement oculaire que par les conséquences que cela peut avoir sur l'attitude de l'avion. Lors d'une manœuvre où la consigne est de conserver l'altitude, si l'avion commence à perdre trop d'altitude, il est courant que les instructeurs considèrent que l'élève n'a pas regardé suffisamment cet instrument. De fait, la correction du comportement oculaire de l'élève est difficile car la détection des

mauvais comportements se fait tardivement et par déduction uniquement. Il y a donc souvent un décalage entre le moment où la première remarque peut être faite et le mauvais comportement de l'élève mais aussi entre le ressenti de l'élève et la déduction de l'instructeur.

L'arrivée des cockpits numériques dans les formations pose donc un certain nombre de problématiques, **dont une des principales concerne l'éducation du comportement oculaire des élèves-pilotes**. Les méthodes d'éducation du comportement oculaire utilisées jusqu'à présent ne semblent plus complètement adaptées à ces nouveaux environnements (*i.e.* le "T" basique) et cela peut se traduire par un apprentissage de moins bonne qualité (Wright & O'Hare, 2015). Cependant il n'est pas possible de refondre complètement la formation de pilotage, et plus spécifiquement la formation dispensée par l'Armée de l'air. Le temps de la formation notamment, est contraint et ne peut que difficilement être changé. Pour pallier les difficultés liées aux *glass cockpits*, la formation de pilotage doit donc être optimisée (Fiduccia *et al.* 2003). Pour cela, l'amélioration des méthodes d'enseignement utilisées pour l'apprentissage du comportement oculaire semble être une solution pertinente au regard de la nature des difficultés citées précédemment. C'est ce thème qui sera l'objet de développement dans le cadre de la présente thèse.

L'idée que l'éducation du comportement oculaire permettrait d'optimiser la formation est d'ailleurs défendue régulièrement. Kramer, Tham, Konrad, Wickens et Lintern (1994) expliquaient que selon eux, l'éducation du comportement oculaire par mimétisme de celui de l'expert serait bénéfique pour un pilote novice. Bellenkes, Wickens et Kramer (1997) avançaient que la connaissance des différences entre les experts et les novices dans le comportement oculaire devrait permettre d'entraîner les pilotes novices à obtenir un comportement oculaire plus efficace et ainsi, idéalement, devrait « *accélérer le développement de leur expertise* ». Selon ces auteurs, le comportement de l'expert semblerait être le **comportement de référence** à atteindre par les novices. De plus, il semblerait que le moment propice à cette

éducation se situe le plus tôt possible dans la formation (Kasarski, Stehwien, Hickox, Aretz et Wickens, 2001). C'est également ce que rapportent Wetzel, Anderson et Barelka (1998) des entretiens qu'ils ont réalisés avec des instructeurs de l'US Air Force. Dans cette étude, Wetzel *et al.* ont sensibilisé ces instructeurs à une nouvelle méthode permettant de surveiller le comportement oculaire des élèves pilotes. A la suite de cette nouvelle expérience pour les instructeurs, tous étaient unanimes quant à l'utilité d'améliorer les outils pour l'enseignement du comportement oculaire, notamment au début de la formation pour éviter que les élèves-pilotes ne prennent de mauvaises habitudes.

L'acquisition d'un comportement oculaire particulier peut être considéré comme l'apprentissage d'une habileté motrice et ce type d'apprentissage nécessite généralement de fournir à l'apprenant un *feedback* sur les actions qu'il a réalisées (Schmidt & Debû, 1993). Dans notre contexte, fournir du feedback sur le comportement oculaire de l'apprenant semble une solution prometteuse mais non sans difficultés. Par exemple, la position du regard d'un élève n'est pas observable à l'œil nu comme le montrent les difficultés des instructeurs. Avoir une connaissance objective de l'emplacement du regard d'une personne nécessite l'utilisation des dispositifs d'*eye tracking* (dispositifs de suivi du regard). La complexité de ce type de dispositif rend son maniement difficile et surtout, tous ne permettent pas une analyse *en temps réel* des données oculaires réduisant ainsi les possibilités de feedback. Par conséquent, l'idée que "*l'apprentissage du comportement oculaire de l'expert serait bénéfique pour un pilote novice*" n'a reçu que très peu de validation expérimentale, en partie dû à ces limitations techniques.

L'objectif principal de la thèse a été d'**évaluer expérimentalement si l'éducation du comportement oculaire des pilotes novices, au début de leur cursus de formation, pouvait apporter des bénéfices** (*i.e.* gain de temps, de performance, etc.). Cette thèse s'inscrit dans un projet de recherche du Centre de Recherche de l'Armée de l'air, visant à améliorer la formation du personnel navigant, c'est à dire, des pilotes et navigateurs de l'Armée de l'air. Elle constitue la première étape permettant

d'ouvrir un terrain autour de cette problématique. Dans ce cadre-là, nous avons fait le choix d'approfondir cette question à **un niveau comportemental** sans forcément aller jusqu'à la description fine des processus cognitifs sous-jacents.

Ce manuscrit présente les travaux réalisés durant trois années. Il est composé de quatre parties principales structurées en deux chapitres chacune.

La première partie vise à situer le contexte théorique dans lequel ces travaux s'inscrivent. Le chapitre 1, décrit les caractéristiques de la situation de pilotage puis recense et présente les principaux travaux portant sur l'éducation du comportement oculaire en détaillant notamment les différentes méthodes d'éducation utilisées, leurs applications et leurs limites. Ces travaux ont montré des résultats prometteurs sur les conséquences de ce type d'éducation, cependant les méthodes utilisées ne sont pas compatibles avec la situation de pilotage. En effet, les situations dans lesquelles l'éducation du comportement oculaire a fait ses preuves sont principalement des situations soit statiques, soit peu complexes et sans incertitude, ce qui est à l'opposé de la situation de pilotage (*i.e.* dynamique et complexe). Nous avons néanmoins tiré deux enseignements essentiels de ces lectures. Le premier concerne l'identification de trois types de méthodes d'éducatons différentes pour lesquels nous proposons une taxonomie. Le second enseignement concerne l'identification d'une démarche commune à toutes ces études. Cette démarche est constituée de 3 étapes principales que nous avons appliquées à notre contexte du pilotage dans le chapitre suivant : (étape 1) identification et modélisation d'un comportement oculaire de référence à éduquer, (étape 2) utilisation d'une méthode d'éducation pour modifier durablement un comportement oculaire d'une personne afin qu'il se rapproche du comportement de référence, et enfin, (étape 3) réalisation de tests pour vérifier que cette éducation apporte bien des bénéfices dans la situation cible.

Le chapitre 2 est ainsi consacré à l'application de cette démarche en trois étapes afin de permettre l'éducation du comportement oculaire dans le contexte spécifique du

pilotage. Dans ce cadre-là, la première étape a consisté à caractériser et modéliser le comportement oculaire des experts-pilotes, comportement de référence dans cette situation. La deuxième étape visait à concevoir une nouvelle méthode d'éducation du comportement oculaire permettant de dépasser les limites des méthodes existantes qui les empêchaient d'être utilisées dans le pilotage. La conception de cette nouvelle manière d'éduquer le comportement oculaire a nécessité le développement d'un outil informatique pour la mettre en œuvre. Cet outil, que nous avons appelé le PilotGazeTrainer (PiGaT) est également décrit dans cette deuxième étape. Il a comme principe général d'*analyser en temps réel* le comportement oculaire d'une personne et de *fournir des notifications* lorsque certains comportements sont identifiés. Enfin, la troisième étape permet de cerner quels sont les bénéfices attendus de cette méthode d'éducation du comportement oculaire que nous proposons.

La deuxième partie de ce manuscrit décrit dans un premier temps (chapitre 3), les outils méthodologiques que nous avons utilisés pour évaluer la méthode d'éducation du comportement oculaire que nous proposons. Nous avons notamment fait le choix de réaliser des tests dans deux environnements différents : un simulateur et un *micromonde*. Un micromonde est une sorte de simulateur *simplifié*, tel un jeu d'ordinateur. Il permet de réaliser des tests en laboratoire en assurant un compromis entre un fort contrôle expérimental et une proximité avec la situation cible (*i.e.* le pilotage) en termes de nature de la situation et de l'activité. Un des avantages du micromonde est qu'il permet de réaliser des tests avec des personnes ne sachant pas piloter. Cela nous a ainsi permis de ne pas exposer, par précaution, des pilotes à des changements comportementaux dont nous n'avions pas vérifié au préalable l'absence de conséquence néfaste pour leur activité. Parmi les micromondes décrits dans la littérature du domaine, aucun ne répondait cependant à nos exigences et à notre cahier des charges pour les expérimentations. Nous avons donc dû concevoir et développer notre propre micromonde que nous avons baptisé : l'AbstractFlyingTask (AFT). Dans ce chapitre, nous définirons donc

les micromondes de manière générale avant de décrire plus en détail le micromonde AFT.

Plusieurs limitations méthodologiques et techniques ont ainsi été dépassées par la conception et le développement d'outils informatiques, tant pour éduquer le comportement oculaire (PiGaT) que pour permettre la réalisation de tests spécifiques en laboratoire (AFT). Cependant, ces *nouveaux* outils nécessitaient d'être vérifiés avant d'être utilisés dans le cadre des questionnements de cette thèse. Le chapitre 4 sera donc consacré à l'explication des deux évaluations expérimentales que nous avons réalisées afin de vérifier (1) la viabilité technique du PiGaT, (2) le fonctionnement de la méthode d'éducation du comportement oculaire que nous proposons en situation dynamique et complexe, et enfin (3) la cohérence du micromonde AFT avec la situation du pilotage. Les résultats ont notamment montré une proximité des comportements oculaires observés sur le micromonde AFT avec ceux observés dans la situation de pilotage. Ces résultats ont également montré que la méthode d'éducation que nous proposons permet de modifier durablement le comportement oculaire des personnes qui en bénéficient. Nous avons fait le choix de séparer ces deux expérimentations des deux expérimentations suivantes, présentées dans la partie III. De cette manière, nous avons souhaité respecter la logique pluridisciplinaire de cette thèse en séparant (a) les expérimentations dont les questionnements portaient sur l'évaluation de l'utilisation des outils informatiques (domaine des Interactions Homme-Machine, Partie II), (b) des expérimentations visant à évaluer le comportement humain (domaine des Facteurs Humains, Partie III).

La troisième partie présente ainsi les deux principales expérimentations de cette thèse. Le chapitre 5 décrit une expérimentation sur le micromonde AFT durant laquelle nous avons questionné les effets bénéfiques de l'éducation du comportement oculaire proposée, sur l'apprentissage d'une tâche plus difficile et sur le transfert vers une tâche plus complexe. Les résultats montrent notamment qu'à durée d'entraînement égale, le groupe ayant bénéficié de notre méthode

d'éducation obtient des performances significativement meilleures que le groupe s'étant entraîné librement lors de la réalisation d'une tâche plus complexe. Enfin, le chapitre 6 traite d'une expérimentation portant sur l'analyse du comportement de 38 pilotes de l'Armée de l'air avec divers niveaux d'expérience, lors d'un vol à vue (VFR) simulé, durant différentes manœuvres de vol. Cette expérimentation a permis d'identifier des différences de performance et de comportement oculaire entre des pilotes de l'Armée de l'air française à différent degré d'expertise (novice, confirmé, expert). Ces différences serviront à affiner la méthode d'éducation du comportement oculaire que nous proposons afin de faire évoluer le comportement oculaire des pilotes-novices le plus rapidement possible vers un comportement efficace pour le pilotage.

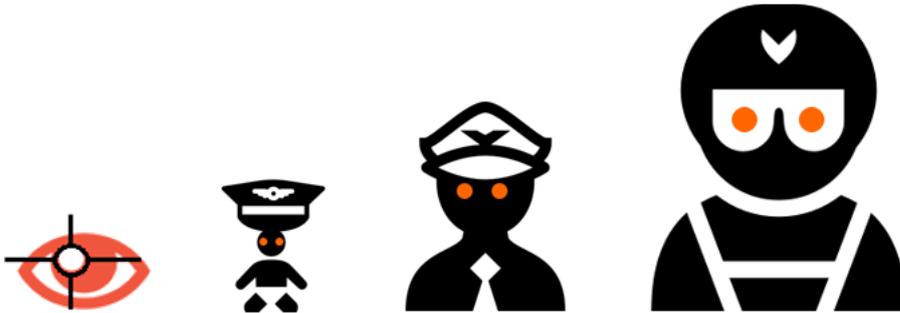
Pour conclure, la quatrième et dernière partie est centrée sur la discussion des résultats obtenus, le résumé des contributions, ainsi que le détail des différentes perspectives amenées par ces travaux de recherche.

** Cette thèse a été cofinancée par la Direction Générale de l'Armement (DGA) et par l'école doctorale Aéronautique & Astronautique de Toulouse (ED AA). L'ED AA est une école doctorale pluridisciplinaire et cette thèse s'inscrit à la fois dans le domaine des Interactions Homme-Machine (Informatique) et des Facteurs Humains (Sciences cognitives). **

Partie I

Le contexte théorique

Chapitre 1



Pilotage et Éducation du comportement oculaire

Cette thèse s'inscrit dans le courant des travaux portant sur l'éducation du comportement oculaire. Une de ses originalités est de s'y intéresser dans le contexte du pilotage d'avion. En effet, les études sur lesquelles nous nous sommes appuyés, se sont focalisées principalement sur des situations bien différentes du pilotage (*e.g.* inspection de circuits imprimés, chirurgie laparoscopique, etc.). Dans ce chapitre, nous détaillerons dans un premier temps une taxonomie qui permet de caractériser les situations selon 3 critères : le dynamisme, la complexité et l'incertitude (Eyrolle, Mariné & Mailles, 1996). A l'aide de cette taxonomie, nous définirons dans un premier temps les particularités de la situation de pilotage, puis nous décrirons l'activité des pilotes dans le cadre de la gestion de cette situation. Une fois cette description du contexte du pilotage achevée, nous dresserons une revue détaillée des travaux portant sur l'éducation du comportement oculaire.

1.1 De la situation à l'activité de pilotage

1.1.1 Comment caractériser une situation telle que le pilotage ?

Selon Eyrolle, Mariné et Mailles (1996) les situations peuvent être caractérisées par leur dynamisme (dynamique *vs* statique), leur incertitude (ouverte *vs* fermée), et leur complexité (simple *vs* complexe).

Le **dynamisme** permet de décrire la faculté d'évolution d'une situation. Par exemple, une situation statique ne peut évoluer que par l'action d'un opérateur humain. L'opérateur humain est la personne chargée de gérer la situation (*e.g.* le conducteur dans la conduite automobile, le pilote dans le pilotage et le joueur d'échecs dans une partie d'échecs). L'exemple des échecs illustre bien le type de situations statiques puisque la partie n'évolue qu'en fonction des déplacements de pièces de l'un ou l'autre des joueurs. A l'inverse, il y a des situations qui évoluent selon une dynamique qui leur est propre et sur laquelle l'opérateur humain ne peut exercer qu'un contrôle partiel (Hoc & Plee, 1996). Essayer de contrôler ces situations dynamiques implique une séquence de décisions et d'actions de la part de l'opérateur. Ainsi, dans une situation dynamique, l'environnement (i) peut changer en fonction de cette séquence de décisions, (ii) peut être indépendant de cette séquence de décisions, ou (iii) les deux à la fois (Edwards, 1962). Cela signifie que les décisions prises et les actions réalisées par les opérateurs influent sur la situation ainsi que sur sa dynamique. Contrairement à un film qui défile sous les yeux et durant lequel chaque personne est confrontée aux mêmes images exactement aux mêmes moments, les opérateurs de situations dynamiques voient à chaque fois une nouvelle situation unique qu'ils auront contribué à créer. Une conséquence de ce dynamisme est donc que les opérateurs concernés sont, en quelque sorte, créateurs de leur propre situation.

L'**incertitude** d'une situation correspond au degré de prédictibilité de l'évolution de la situation. Dans ce cadre-là, Schmidt et Debû (1993) utilise une classification

différenciant les situations ouvertes, dans lesquelles l'environnement est variable et donc potentiellement imprévisible, et les situations fermées pour lesquelles l'évolution peut être connue avec certitude.

Enfin, la notion de **complexité** permet de caractériser une situation par rapport à la difficulté que représente sa compréhension et son contrôle par un opérateur humain. Un certain nombre de facteurs influent sur cette complexité comme par exemple, le nombre et la nature des éléments à prendre en compte lors de la réalisation de la tâche, ou encore le nombre et la nature des actions à réaliser. De plus, le dynamisme et l'incertitude jouent également sur cette complexité. Généralement, une situation dynamique et ouverte est souvent complexe puisque l'opérateur devra prendre des décisions dans un temps limité sans connaître avec certitude toutes les conséquences de ses actions. Enfin, la complexité est aussi liée au concept de charge cognitive (Chanquoy, Tricot, & Sweller, 2007) puisque plus la situation est complexe, plus elle nécessite la mobilisation de ressources mentales de la part de l'opérateur.

A la lumière de cette taxonomie, la situation de pilotage d'un avion peut donc aisément être définie comme dynamique, complexe et ouverte. En effet, le pilote se trouve dans une situation qui évolue en permanence et durant laquelle certains événements imprévus peuvent survenir (*i.e.* une panne, un défaut de l'avion, un changement météorologique). L'évolution constante et incertaine de la situation constitue une difficulté dans la planification des états et événements futurs, et rend la situation complexe. Nous allons maintenant nous intéresser à la délicate « activité » du pilote, à savoir, la gestion en continu de cette situation.

1.1.2 L'activité de pilotage

Selon Wickens (2002), l'activité de pilotage, peut être décomposée en quatre classes de tâches différentes. L'auteur énumère ces classes par l'acronyme ANCS pour "Aviating, Navigating, Communications and Systems management". Le premier

terme "Aviating" correspond aux tâches permettant de maintenir l'avion en vol, de réaliser des manœuvres et d'assurer la sécurité du vol en contrôlant l'attitude de l'avion et en évitant les dangers extérieurs. Le deuxième terme "Navigating" correspond aux tâches permettant au pilote de conduire l'avion d'un point A à un point B dans un repère en trois dimensions en suivant une trajectoire plus ou moins planifiée. Le terme "Communication" correspond aux tâches de communication dans la cabine et avec le contrôleur aérien. Et enfin l'expression "Systems management" correspond aux tâches de gestion des différents systèmes de l'avion : gestion d'un pilote automatique, gestion du fuel, de la pression de la cabine, etc.

Dans le champ de la littérature nous concernant, le terme "pilotage" est souvent utilisé de manière confuse pour définir une ou plusieurs tâches du ANCS. Dans la suite de ce manuscrit, **nous utiliserons ce terme uniquement pour faire référence à la tâche "Aviating"** décrite plus haut. Ainsi, le pilotage se définit comme une activité complexe pour laquelle le pilote doit réaliser plusieurs tâches de nature différente, et doit gérer une situation dynamique et ouverte, qui évolue rapidement et dans laquelle des événements imprévisibles peuvent survenir. C'est donc dans ce contexte-là que nous nous sommes intéressés plus précisément à l'éducation du comportement oculaire.

1.2 Du comportement oculaire à l'éducation du comportement oculaire

Avec le développement de méthodes d'observation des mouvements des yeux, il est devenu possible de déduire et d'étudier l'endroit regardé par une personne. Afin de réduire un peu la complexité de ce type d'études, des capteurs physiologiques dédiés au suivi du regard ont également vu le jour (les *eye trackers*), et les usages se sont multipliés vers la fin du XXe siècle (pour plus d'informations sur l'histoire des techniques de suivi du regard, voir les revues de Duchowski, 2007, p. 51-59, et de Holmqvist *et al.*, 2011, p. 9-11). Ces capteurs ont permis d'obtenir un grand nombre de mesures de l'activité oculaire d'une personne (*e.g.* clignements

des yeux, fixations du regard, changements de direction du regard, etc.). Cette activité correspond au **comportement oculaire** de la personne. Ce comportement peut être décrit comme l'ensemble des actions et réactions qu'un individu effectue avec ses yeux dans une situation donnée. Le comportement oculaire se compose principalement d'une alternance de mouvements rapides de l'ordre de 10 à 100 millisecondes (les **saccades**) et de périodes plus longues - plus de 100 millisecondes - durant lesquelles les yeux restent presque immobiles (les **fixations**). L'analyse plus fiable et objective de ces mesures de l'activité oculaire a ainsi permis d'en apprendre davantage sur la récupération d'informations visuelles et sur la manière dont ces informations sont traitées cognitivement (Rayner, 1998).

Dans le contexte du pilotage, le terme **circuit visuel** (*scanpath*) est tout aussi souvent utilisé pour décrire cette manière de récupérer les informations par le regard. Alors que le « comportement oculaire » est un terme très général, le terme de circuit visuel définit plus spécifiquement une séquence ordonnée de fixations du regard dans un espace et un temps donné. Le circuit visuel est délimité par un début ainsi qu'une fin, et de fait, peut également être décrit par une distance et un temps (Holmqvist *et al.*, 2011, p254). Lors de la lecture d'une page ou le visionnage d'une image fixe, le circuit visuel est facilement identifiable et peut ainsi être analysé précisément (*i.e.* propriétés du circuit visuel : début, fin, durée, distance). En revanche, la situation de pilotage est dynamique et complexe. Les pilotes réalisent ainsi plusieurs circuits visuels différents pour répondre aux particularités des situations qu'ils rencontrent. Les situations qu'ils rencontrent sont d'ailleurs toutes différentes d'un pilote à un autre et d'un vol à un autre. En effet, l'évolution de la situation dépend en partie des actions du pilote et chaque pilote ne réalise pas forcément exactement les mêmes actions aux mêmes moments. Tous rencontrent ainsi des situations différentes qu'ils traitent en réalisant des enchaînements différents de circuits visuels. Cette particularité de la situation rend compliquées l'étude et la comparaison des circuits visuels entre différents pilotes. Durant cette thèse, nous sommes positionnés au

niveau du comportement oculaire, et nous n'avons pas étudié spécifiquement le (ou les) circuit(s) visuel(s) des pilotes.

Comme tous les comportements perceptivo-moteurs, le comportement oculaire peut être étudié en tant qu'**habileté motrice**. En effet, une habileté "consiste en la capacité de parvenir à un résultat avec le maximum de certitude et des dépenses d'énergies, ou de temps et d'énergie, minimales" (Guthrie, 1935, cité par Schmidt et Debû, 1993, p4). Dans le cas nous concernant, cela signifie récupérer les informations visuelles nécessaires à la bonne réalisation de la tâche de manière efficace et efficiente. La suite de ce chapitre dresse une revue des études portant sur le développement de cette habileté motrice, autrement dit, sur l'éducation du comportement oculaire. Nous avons fait le choix de présenter cette revue de manière chronologique afin de faire ressortir l'évolution des méthodes qui est fortement imprégnée des évolutions technologiques. Cette revue sera suivie d'une analyse des limites et enseignements que nous avons tirés des travaux de recherche présentés.

1.2.1 Revue chronologique des travaux de recherche dédiés à l'éducation du comportement oculaire

Selon plusieurs auteurs (Schriver, Morrow, Wickens et Talleur, 2008 ; Bellenkes *et al.*, 1997), le comportement oculaire d'une personne lors de la réalisation d'une tâche serait le fruit des connaissances acquises par l'expérience et la pratique de cette tâche, autrement dit, par son expertise de la tâche. L'expertise décrit un état de connaissances acquis suite à un apprentissage, le plus souvent long, permettant de réaliser une tâche avec un haut niveau de performance de manière certaine et répétée, en mobilisant un minimum de ressources mentales et physiques nécessaires à la bonne réalisation de la tâche. Depuis les travaux de Binet (1894), De Groot (1946, 1965) et Chase & Simon (1973) il est communément admis que la mémoire où sont stockées les connaissances des experts (connaissances complexes) joue un rôle important dans l'expertise. Il est également admis que l'expertise est

principalement perceptive puisque c'est au travers de la reconnaissance d'éléments connus plus ou moins complexes, que les experts ont accès à un grand nombre de connaissances (sémantiques, stratégiques, etc.) très rapidement et sans effort mental puisque stockées en mémoire à long terme (voir les revues de Gobet, 2011 ; Didierjean, Ferrari et Marmèche, 2004 ; ou Ericsson, Charne, Feltovich et Hoffman, 2006). Pour illustrer cela, Didierjean *et al.* (2004) utilisent une citation de De Groot (1965) qui nous intéresse particulièrement : "Un maître (au jeu d'échecs) ne cherche pas le bon coup, il le voit". Au jeu d'échecs comme ailleurs, les experts auraient en mémoire un nombre très important de connaissances complexes qui seraient, dans ce cas précis, des groupements de pièces appelés *chunks*. Ces connaissances sont complexes car les experts peuvent aussi stocker la valeur sémantique de ces éléments, ainsi que des actions stratégiques à effectuer (*i.e.* le bon coup) pour réagir au mieux lorsque ces éléments sont reconnus. Pour les experts du jeu d'échecs, la connaissance du coup suivant à jouer n'est donc pas le fruit d'une analyse de la situation et d'une recherche coûteuse du bon coup, mais l'accès à ce coup stocké en mémoire à long terme. De fait les experts de ce jeu, ne « voient » pas et ne regardent pas l'échiquier de la même manière que les moins expérimentés. Le développement du comportement oculaire semble donc se faire de manière non consciente par l'accumulation de connaissances en mémoire qui permettent une perception différente de l'environnement. Par conséquent, il est difficile de penser qu'apprendre à une personne qui ne possède pas ces connaissances (*i.e.* un novice) à regarder aux mêmes endroits qu'un expert puisse être bénéfique. En effet, en regardant exactement aux mêmes endroits, les deux personnes n'auront pas « accès » aux mêmes informations stockées en mémoire, ne comprendront pas la situation de la même façon et donc ne pourront pas prendre les mêmes décisions. Dans ce courant de pensée, pour une tâche donnée, l'éducation du comportement oculaire ne peut ainsi pas permettre de s'affranchir de la pratique intensive de cette tâche.

Pour autant, il semblerait que l'éducation du comportement oculaire puisse être bénéfique dans certaines situations. Dans les années 1980, plusieurs laboratoires ont

collaboré dans le cadre du projet de recherche appelé "The learning strategies program", dont notamment le laboratoire de psychologie cognitive (CPL) de l'université de l'Illinois. Ce programme a été soutenu par la Defense Advanced Research Projects Agency qui est une agence du département de la Défense des États-Unis chargée de la recherche et du développement des nouvelles technologies destinées à un usage militaire. Dans le cadre de ce projet, un jeu vidéo, *Space Fortress* (Mané & Donchin, 1989), a été développé et a servi d'outil de recherche pour l'étude du rôle de la pratique dans l'acquisition de compétences (Donchin, 1995). Le principe de ce jeu est de détruire une forteresse centrale à l'aide d'un vaisseau (spatial) tout en évitant des mines et autres dangers (figure 2). Dans le cadre de ce projet, Shapiro et Raymond publient en 1989 une étude portant sur l'éducation de stratégies visuelles permettant d'améliorer l'acquisition de compétences sur le jeu vidéo *Space Fortress*. Concernant ce jeu, ils ont défini ce qui était pour eux le comportement oculaire le plus efficace. Selon eux, un comportement oculaire est efficace dans un environnement qui change continuellement si et seulement si (a) les saccades vers des stimuli précédemment analysés ou vers des éléments connus pour être invariants et/ou non-pertinents sont éliminées ; (b) si la fovéa n'est pas déplacée lorsque les informations peuvent être traitées en vision périphérique ; (c) si les suivis d'éléments mouvants non-pertinents pour l'activité sont inhibés ; et (d) si l'attention est utilisée pour répondre aux besoins de la tâche. Pour les besoins d'une expérience, ils ont conçu deux lots de petits exercices visant à éduquer le comportement oculaire. Ces exercices sont supposés induire chez les personnes les pratiquant, des changements dans le comportement oculaire qui sont censés améliorer la réussite de la tâche principale (*i.e.* détruire la forteresse). Le premier lot d'exercices permettait aux personnes d'acquérir un comportement plus efficace tandis que le second permettait à l'inverse, d'acquérir un comportement jugé non efficace. Par exemple, dans le premier lot, certains exercices permettaient d'apprendre à éliminer les mouvements des yeux non nécessaires (stratégie efficace) alors que l'autre lot favorisait la réalisation de mouvements des yeux à chaque fois qu'un stimulus apparaissait en vision périphérique (stratégie non-efficace).



Figure 2 - Capture d'écran d'une version du jeu Space Fortress

Shapiro et Raymond (1989) ont ainsi réalisé une expérimentation dans laquelle 33 participants ont pratiqué le jeu Space Fortress soit (1) sans apprentissage de stratégies visuelles au préalable (groupe contrôle), soit (2) après l'apprentissage de la stratégie efficace ou soit (3) après l'apprentissage de la stratégie non-efficace. Les résultats ont montré que les personnes ayant appris la stratégie efficace grâce à la pratique des petits exercices *ad hoc*, obtiennent des performances meilleures que celles des personnes ayant appris la stratégie non-efficace, ces dernières étant non-différentes du groupe contrôle. Ces résultats démontrent bien qu'**il est possible d'éduquer le comportement oculaire d'une personne et que cela peut être bénéfique pour des novices, lors de la pratique d'une tâche dynamique et complexe.**

Dans une autre étude réalisée à la fin des années 1990, Wetzel *et al.* (1998) ont fourni à des instructeurs de l'US Air Force un système permettant de visualiser, en temps réel sur un écran, le regard des élèves pilotes durant des vols sur simulateur. Ce système comprenait un *eye tracker* porté (*head-mounted*) et un écran affichant l'endroit où se portait le regard de la personne équipée. Ainsi cela fournissait aux instructeurs cette nouvelle information, ce qui leur permettait de déceler des mauvais comportements oculaires et prodiguer alors des feedbacks aux élèves afin qu'ils les corrigent. Après sept mois d'utilisation, les instructeurs ont répondu à un questionnaire portant sur leur ressenti par rapport à l'utilité de cet outil. Les

résultats montrent que l'utilisation de ce système est jugée bénéfique pour l'entraînement des élèves par 90% des instructeurs interrogés. Parmi ces mêmes instructeurs, 82% ont également répondu avoir remarqué des améliorations dans l'entraînement aux situations d'urgence, et tous (100%) sont unanimes quant au potentiel de ce genre d'outil au début de la formation pour éviter aux élèves de prendre de mauvaises habitudes visuelles. Toutefois, cette étude soulève quelques écueils, notamment en ce qui concerne le traitement des données oculaires. En effet, dans ce cas d'utilisation, ce sont les instructeurs eux-mêmes qui étaient à la fois en charge de la gestion du vol et de la surveillance de la position du regard de l'élève sur l'écran supplémentaire fourni. Durant cette surveillance du regard de l'élève, il était délicat pour les instructeurs de rester attentif aux autres aspects du vol et inversement. Ainsi, ce travail demande encore plus de ressources aux instructeurs et il est probable que certains mauvais comportements oculaires ne soient pas détectés, tout comme certaines erreurs de pilotage.

Dans une autre situation plus statique, Sadasivan, Greenstein, Gramopadhye et Duchowski (2005) se sont intéressés à la tâche d'inspection visuelle des avions avant un vol. Cette étape est cruciale car elle engage la sécurité des avions. Il y avait donc un enjeu important à entraîner le mieux possible les futurs inspecteurs de ces avions. Les auteurs ont réalisé une expérimentation dans laquelle ils ont entraîné des personnes à inspecter des avions, soit (i) sans aucune aide, soit (ii) en suivant le *circuit visuel* d'un expert. La tâche d'inspection se réalisait dans un environnement virtuel à l'aide d'un casque de réalité virtuelle. Cet environnement leur a permis d'afficher le circuit visuel à réaliser (correspondant à celui réalisé par l'expert), en surimpression des parois de l'avion à inspecter, pour le groupe concerné. Ce circuit visuel était constitué de cercles et de flèches symbolisant respectivement les fixations et saccades de l'expert (figure 3). Ainsi, les personnes immergées dans cet environnement, qui bénéficiaient de cet affichage, pouvaient à leur rythme, reproduire exactement le parcours effectué par l'expert. Les résultats montrent que les participants ayant bénéficié de cette aide durant l'entraînement, sont plus performants et plus rapides lors du test de rétention dans l'inspection de l'avion par

rapport aux personnes ne l'ayant pas reçue. Guider des novices à imiter le circuit visuel de l'expert, leur permettrait d'atteindre une performance meilleure plus rapidement. Cet effet ne serait pas uniquement transitoire puisqu'il est mesuré une fois l'aide enlevée lors du test de rétention.

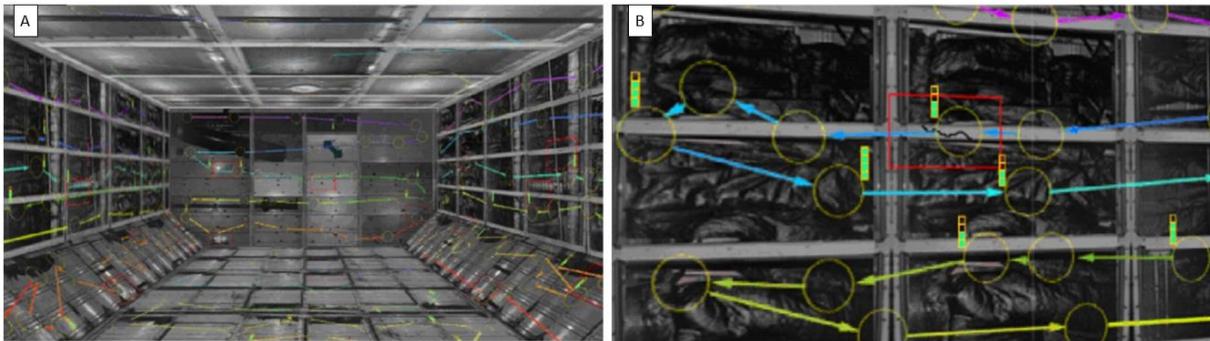


Figure 3 – Affichage de la soute d'un avion-cargo en environnement virtuel, augmenté de l'affichage du circuit visuel des experts Sadasivan *et al.* (2005). L'affichage de ce parcours est réalisé en surimpression des parois avec des cercles symbolisant les fixations et des flèches symbolisant les saccades.

De manière similaire, Nalanagula, Greenstein & Gramopadhye (2006) ont utilisé ce même type de guidage dans une tâche d'inspection visuelle de circuits imprimés avec trois visualisations différentes de la même stratégie experte : statique, dynamique ou hybride (figure 4). La visualisation statique peut être comparée à celle utilisée par Sadvivan *et al.* (2005). En effet, le circuit visuel de l'expert était affiché en surimpression du circuit imprimé à inspecter. La visualisation dynamique correspondait, quant à elle, à un cercle jaune qui parcourait ce même circuit imprimé en suivant le cheminement de l'expert mais de manière ralentie (250 secondes au lieu de 40-50 secondes pour les experts). La visualisation hybride est identique à la visualisation dynamique à l'exception près que le passage du cercle jaune laissait une trace statique du circuit visuel réalisé jusque-là. Les résultats montrent la supériorité de la visualisation hybride sur la dynamique, elle-même meilleure que la visualisation statique. A noter toutefois que, comme dans l'expérimentation de Sadvivan *et al.* (2005), même la moins bonne visualisation (statique) permet d'obtenir une meilleure performance que celle des personnes n'ayant pas eu connaissance du comportement oculaire de l'expert à réaliser.

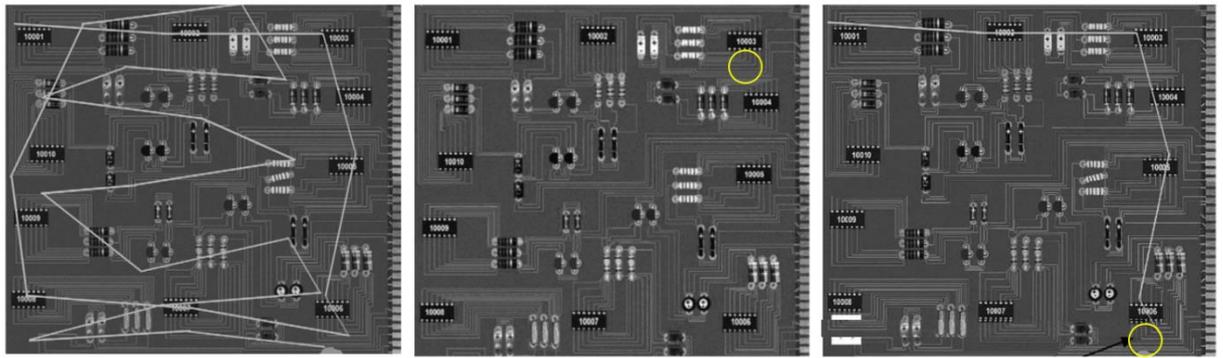


Figure 4 – Illustration des trois visualisations de la stratégie experte utilisée par Nalanagula *et al.* (2005) en surimpression de circuits électriques. De gauche à droite, sont présentées les visualisations : statique, dynamique et hybride. Sur les deux dernières images, le cercle jaune a été recoloré et symbolise la position du regard de l'expert.

Plus récemment encore, Becic, Boot et Kramer (2008) ont étudié les stratégies de recherche visuelle utilisées par des personnes âgées. Le principe de la tâche était de déceler, sur un écran d'ordinateur affichant des points de couleur se déplaçant, l'apparition de nouveaux points de couleur. Pour ce type de tâche, deux stratégies de recherche visuelle ont été caractérisées dans la littérature (Boot *et al.* 2006) : une stratégie de recherche dite 'active' où la personne parcourt l'écran avec de nombreux mouvements oculaires, et une stratégie de recherche dite 'passive' où la personne fait peu de mouvements oculaires et attend de percevoir l'apparition du point. Cette dernière est considérée comme étant la bonne stratégie à adopter pour ce type de tâche. Après avoir identifié la stratégie utilisée naturellement (passive ou active) par les participants lors d'une première session de la tâche de recherche, il leur était demandé d'adopter la stratégie inverse lors d'une seconde session. Les résultats montrent que les personnes à qui il a été demandé d'adopter la bonne stratégie ont amélioré leurs performances de détection visuelle. Inversement, les personnes à qui il a été demandé d'adopter délibérément une mauvaise stratégie de recherche visuelle ont vu leurs performances diminuer. Dans cette étude, il a donc suffi de donner une indication relativement simple pour faire passer d'une stratégie à une autre et, comme dans les exemples précédents, lorsque la stratégie visuelle est améliorée, les performances le sont aussi.

L'éducation du comportement oculaire a également été étudiée dans le contexte du développement infantile. Wass, Porayska-Pomsta et Johnson (2011) ont évalué les

bénéfices d'éduquer le comportement oculaire de très jeunes enfants (11 mois) à l'aide de petits jeux utilisant des interactions avec le regard. Une quarantaine d'enfants de 11 mois ont été répartis en deux groupes expérimentaux (Contrôle et Entraîné) et, sur une durée de 15 jours, chaque enfant a réalisé 5 visites en laboratoire. Lors de la première et de la dernière visite, une batterie de tests était réalisée pour évaluer différentes habiletés comme par exemple la capacité à soutenir son attention, les capacités de « contrôle cognitif » (inhibition d'anciennes règles durant l'acquisition de nouvelles), ou encore les capacités de mémoire de travail. Lors de chaque visite, les enfants du groupe « *Entraîné* » réalisaient des petits jeux d'entraînement utilisant le regard comme modalité d'interaction. Par exemple, la première tâche comprenait un papillon qui disparaissait à chaque fois que l'enfant fixait ce dernier. Durant ce même temps, les enfants du groupe contrôle regardaient des clips vidéo ou des dessins animés, sur une télévision. Les résultats des batteries de tests montrent que les enfants ayant reçu un entraînement sur les jeux interactifs contrôlent mieux leur attention par rapport à des enfants ne l'ayant pas eu. Le temps de désengagement de l'attention porté à un stimulus serait significativement réduit, la capacité à soutenir son attention lorsque nécessaire serait significativement plus grande et le temps de réaction serait également réduit. L'éducation du comportement oculaire est donc bénéfique dans ce contexte alors qu'elle n'est pas faite dans le but d'améliorer la performance à une tâche spécifique. De manière plus générale, cela semble permettre d'améliorer la façon de contrôler la répartition de l'attention visuelle.

Dans un tout autre secteur (le domaine médical), les bénéfices d'une éducation du comportement oculaire sur la performance ont été démontrés. En 2014, Tien *et al.* ont réalisé une revue des usages des dispositifs d'*eye tracking* pour l'évaluation et l'entraînement de compétences en médecine. Dans la partie portant sur l'entraînement, les auteurs présentent plusieurs études dans lesquelles des dispositifs d'*eye tracking* ont été utilisés pour l'éducation du comportement oculaire. La tâche la plus étudiée dans ces études est la chirurgie laparoscopique. La chirurgie laparoscopique est une technique chirurgicale peu invasive où le chirurgien réalise

une opération de l'abdomen par de petites incisions permettant le passage d'une caméra optique et de fins instruments chirurgicaux (figure 5A). Par exemple Wilson, Vine, Bright, Masters, Defriend et McGrath (2011) ont étudié l'utilité d'éduquer le comportement oculaire de personnes novices pour l'apprentissage des compétences techniques liées à la pratique d'une tâche d'entraînement à la chirurgie laparoscopique (déplacement de balles microscopiques, figure 5B).

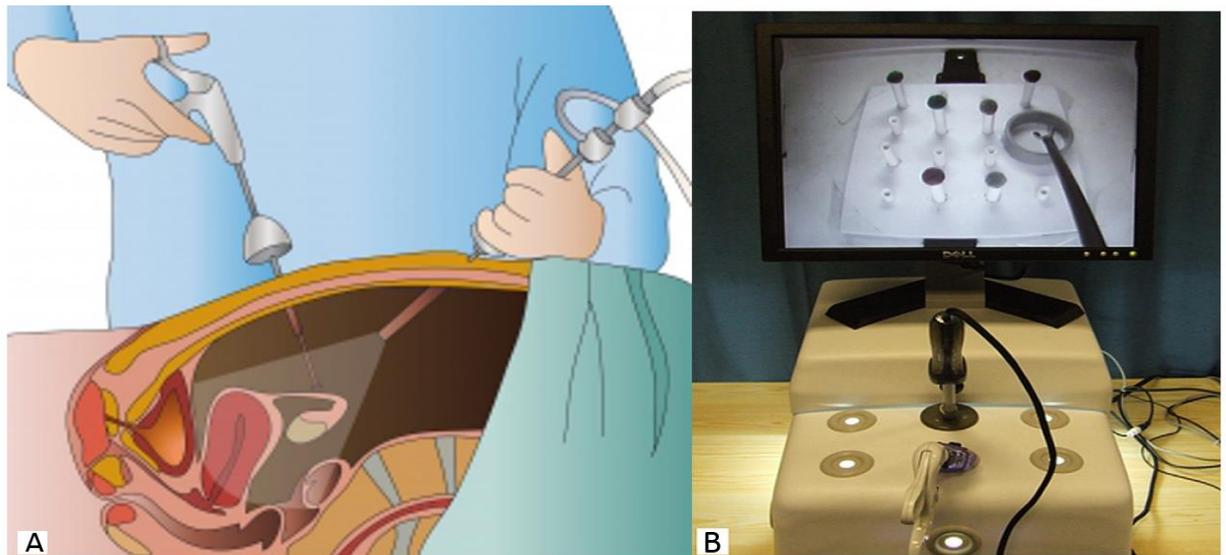


Figure 5 – (A) Image schématisant le principe de la chirurgie laparoscopique. (2017). Repérée à <http://kinderwensbloggers.com/de-operatie-laparoscopie/>. (B) Photographie de la tâche d'entraînement utilisée par Wilson *et al.* (2011) tirée de l'article de Vine, Masters, McGrath, Bright et Wilson (2012).

Pour cela, les auteurs ont souhaité comparer une méthode de formation centrée sur le comportement oculaire (GazeTraining) à une méthode plus classique centrée sur l'entraînement des mouvements (MoveTraining) ainsi qu'à un apprentissage plus libre (DiscoveryTraining). L'entraînement du comportement oculaire s'est déroulé en plusieurs étapes. Après un premier test de contrôle, les participants du groupe GazeTraining ont visionné une vidéo dans laquelle un expert réalisait la tâche d'entraînement à la chirurgie laparoscopique augmentée de la position du regard de cet expert. Ces participants ont ensuite reçu des explications sur la stratégie visuelle à adopter avant de réaliser à leur tour un essai de la tâche. Puis, ils visionnaient la vidéo de leur essai augmenté de la position de leur propre regard. Durant ce visionnage il leur était demandé de commenter les différences qu'ils percevaient avec le comportement de l'expert. Ce procédé était répété lors d'un essai

supplémentaire. A la suite de ces premiers essais, ils réalisaient 7 nouveaux essais qui étaient tous suivi de feedbacks sur leur comportement oculaire de la part de l'expérimentateur. Ainsi, la méthode d'éducation utilisée est un mélange de guidage (*i.e.* présentation et explication du comportement de l'expert) et de feedbacks personnalisés sur le comportement oculaire du participant. Les autres groupes recevaient un entraînement similaire mais porté sur les mouvements des instruments de l'expert (pas d'affichage des positions du regard) pour le groupe MoveTraining, et sans indication pour le groupe DiscoveryTraining. Après cette phase d'entraînement, tous les participants étaient à nouveau évalués (post-test) avant de faire une petite pause. Ils étaient ensuite initiés à une seconde tâche visant à les distraire durant la réalisation de la tâche de chirurgie laparoscopique. Quatre sons différents étaient émis dans un ordre aléatoire dont l'un d'entre eux était considéré comme le « son cible ». Cette tâche consistait à compter le nombre d'apparitions de ce « son cible » et d'ignorer les autres sons. Une fois familiers avec cette nouvelle tâche, les participants réalisaient un dernier test durant lequel ils devaient réaliser les tâches de chirurgie laparoscopique et de distraction simultanément. Les résultats du post-test montrent que le groupe ayant reçu l'éducation du comportement oculaire (GazeTraining), réalise la tâche de chirurgie plus rapidement sans différence de longueur de parcours par rapport aux deux autres groupes. Ces résultats montrent également que le groupe GazeTraining a modifié son comportement oculaire entre le pré-test et le post-test. Enfin, les résultats lors du test intégrant la seconde tâche montrent que les participants du groupe GazeTraining ont conservé le comportement oculaire appris précédemment, mais également qu'ils réalisent la tâche de chirurgie significativement plus rapidement tout en ayant une tendance à réaliser moins d'erreurs dans la réalisation de la seconde tâche. Cette étude montre des résultats clairs quant aux bénéfices que peut apporter une éducation du comportement oculaire. Cette éducation a permis aux personnes en ayant bénéficié d'être plus performantes sur une tâche nécessitant de fortes compétences techniques. Elle leur a également permis de dégager des

ressources mentales leur permettant de mieux gérer (moins d'erreurs) une situation qui se complexifiait avec l'ajout d'une seconde tâche.

Dans la continuité de ces travaux sur cette tâche d'entraînement à la chirurgie laparoscopique, Vine, Masters, McGrath, Bright et Wilson (2012) ont évalué une autre méthode d'éducation du comportement oculaire plus contraignante. Cette méthode consistait à afficher un masque noir transparent sur tout l'écran excepté une petite zone (figure 5B pour l'écran, figure 6 pour le masque noir). Cette petite zone était de fait plus lumineuse et donc mise en saillance, ce qui guidait fortement le regard de la personne sur cette localisation. L'emplacement de cette zone à regarder correspondait au comportement que les experts auraient eu dans une situation similaire.

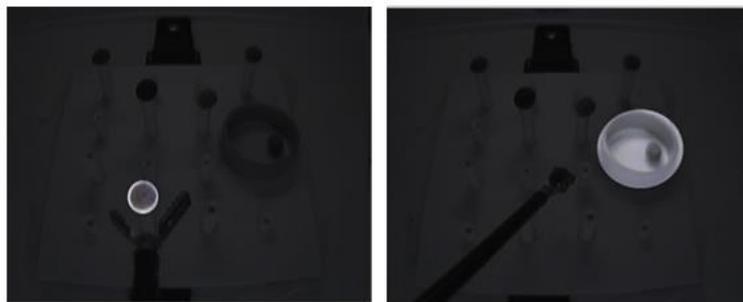


Figure 6 – Mise en saillance de l'endroit à regarder dans l'étude de Vine *et al.* (2012). L'affichage de l'écran est noirci par une sorte de voile noir transparent, à l'exception de l'endroit à regarder qui est par conséquent mis en saillance. La position de cet endroit à regarder était modifiée manuellement par l'expérimentateur en fonction des actions du participant.

Les participants répartis en deux groupes, réalisaient un premier test avec un affichage normal, puis ils réalisaient 50 essais d'entraînement avec l'environnement contraint (groupe entraîné) ou l'environnement normal (groupe contrôle). Après cet entraînement, ils réalisaient quatre sessions d'évaluation dont deux étaient en condition de stress (ordre contrebalancé). Les résultats ont montré que les personnes ayant bénéficié de l'aide (guidage) durant l'entraînement ont bien adopté la stratégie visuelle des experts. L'adoption de cette stratégie leur a permis d'être plus performantes à la tâche (vitesse de complétion et erreurs) dans les deux conditions d'évaluation (normale ou sous stress).

Toujours dans le domaine médical et plus spécifiquement dans l'analyse visuelle médicale (clinique) de patients à l'aide de vidéos, Jarodzka *et al.* (2012) ont expérimenté trois autres manières de présenter le comportement de l'expert à des élèves. La première manière consistait à donner uniquement des explications orales sur ce comportement de l'expert (groupe contrôle) durant le visionnage d'une vidéo d'inspection d'un patient. La deuxième prenait la forme, sur cette même vidéo, d'un petit cercle représentant la position du regard l'expert. Et la dernière, à l'instar de la méthode de Vine *et al.* (2012), était une autre version de cette vidéo dans laquelle les endroits regardés par l'expert étaient mis en saillance par le floutage des autres parties de l'image (endroits non regardés par l'expert). Ces trois manières de présenter le circuit visuel correspondent à des guidages (*feedforward*) plus ou moins contraints. En effet, le floutage des zones non-regardées par l'expert oblige les élèves à ne regarder que les endroits mis en saillance alors qu'à l'opposé les explications orales ne contraignent en rien les élèves. Les résultats ont montré que la manière la plus contraignante (mise en saillance) permettait de mieux guider les élèves dans l'apprentissage des endroits pertinents à regarder de la vidéo. De plus, lors du test de rétention, les élèves ayant bénéficié de ce type de présentation ont obtenu de meilleures performances quant à l'interprétation des symptômes des patients.

Récemment, l'éducation du comportement oculaire a aussi démontré son utilité dans le cadre de la réduction des symptômes des personnes atteintes de troubles du spectre autistique (TSA). Une des caractéristiques de ce handicap, encore incurable aujourd'hui, est notamment la difficulté à entrer en interaction sociale avec autrui. Cette difficulté vient en partie du fait que les personnes atteintes de TSA ne regardent pas forcément les endroits où se trouvent les signes précurseurs de la prise de contact (*i.e.* gestes, expression du visage). C'est pourquoi Wang, Wall et Kim (2015) ont cherché à éduquer des enfants atteints de TSA à regarder aux endroits pertinents (là où regarderaient des personnes non atteintes de TSA) durant le visionnage de séquences vidéo. Dans celles-ci, des acteurs exécutaient des activités de la vie courante comme composer un numéro de téléphone, parler directement à la caméra (engagement dyadique) ou engager un échange avec un

autre acteur. Pour que ces enfants apprennent à regarder aux endroits pertinents de ces vidéos, les auteurs ont conçu une méthode d'éducation utilisant un *eye tracker*, qui consiste à délivrer du feedback en temps réel, afin de rediriger l'attention visuelle des enfants vers les zones pertinentes en cas d'égarement de leur regard. L'objectif était que cet apprentissage se transfère dans la vie réelle. La mise en œuvre de leur technique nécessite dans un premier temps la caractérisation du comportement dit « de référence » correspondant aux endroits regardés par des enfants sains. Pour ce faire, les auteurs ont donc proposé à des enfants sains de visionner ces séquences vidéo. Les traces oculaires de ces enfants ont été juxtaposées sur chaque image des vidéos, ce qui a permis de générer des cartes de chaleurs pour chacune de ces images (figure 7a).

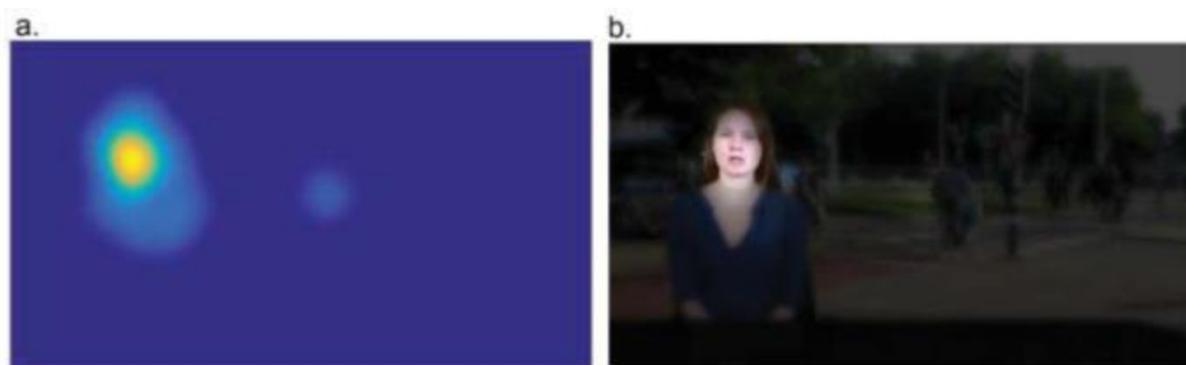


Figure 7. Carte de chaleur des enfants sains (a) et vidéo avec le voile de redirection du regard (b) (Wang *et al.*, 2015).

Les auteurs ont ensuite créé des vidéos spécifiques de « redirection du regard » en appliquant un filtre de flou gaussien et un filtre d'assombrissement à chaque image de la vidéo d'origine en fonction de la densité spatio-temporelle de la carte de chaleur obtenue (figure 7b). Enfin, au cours d'une expérimentation, ces vidéos ont été utilisées dans une phase d'entraînement pour rediriger l'attention des participants chaque fois que ces derniers s'éloignaient du comportement de référence d'une certaine valeur seuil. Les résultats obtenus sont prometteurs et montrent que la technique utilisée permet bien une modification du comportement oculaire bien qu'aucun transfert n'ait été mesuré pour l'instant (sur d'autres séquences vidéo). Toutefois, certains écueils apparaissent dans cette étude dont le

principal est la rigidité contraignante du protocole expérimental. En effet, pour les besoins de cette technique, il était nécessaire d'exposer toutes les personnes exactement aux mêmes images aux mêmes moments. Sans cette synchronisation parfaite, les auteurs n'auraient pas pu identifier les instants où les participants regardaient à des endroits éloignés du comportement de référence. En effet, le système d'*eye tracking* donne une position dans le repère correspondant à l'écran où les films étaient visionnés. Ainsi le centre de l'écran était peut-être considéré comme l'endroit pertinent sur une image donnée, mais pas forcément sur la suivante. Il était donc crucial que les enfants sains ainsi que les participants de l'expérimentation soient exposés aux mêmes images aux mêmes moments. C'est pourquoi cette méthode d'éducation semble particulièrement pertinente pour des situations bien contrôlées tels que les films. Nous pouvons raisonnablement penser que des applications de cette méthode pourraient être trouvées dans les situations statiques telles que celle utilisée par Sadasivan *et al.* (2005) ou Jarodzka *et al.* (2012). Cependant cette méthode semble être d'une utilité limitée dans le cadre de situations dynamiques et complexes telles que le pilotage pour lesquelles la reproduction à l'identique des situations n'est pas possible.

Un nombre grandissant d'études montre donc l'intérêt d'une éducation du comportement oculaire pour le développement de l'expertise. Cependant, l'éducation du comportement oculaire, seule, ne permet pas de transformer des novices en experts, ce qui va dans le sens de la littérature classique sur l'expertise (Ericsson *et al.*, 2006). Comme l'indiquent Vine *et al.* (2012), cela permet seulement de "tricher" en permettant aux novices d'optimiser leur temps de pratique. Ainsi, cette éducation du comportement oculaire permettrait, pour un temps de pratique donné, d'atteindre des performances plus élevées comparé à des personnes laissées libres dans leur pratique. Cet apprentissage semble durable dans le temps et résistant au stress (Vine *et al.*, 2012). Pour autant, pour que cette éducation soit réellement bénéfique, il faut parfois vérifier que cet apprentissage se transfère correctement sur la situation cible (Wang *et al.*, 2015), et que le comportement appris

est pertinent pour la tâche à réaliser. Autrement cet apprentissage risque de ne pas être utilisé (Shapiro & Raymond, 1989) ou de mener à une perte de performance (Becic *et al.*, 2008). La partie suivante formalise les principaux enseignements tirés de ces études.

1.2.2 Principaux enseignements tirés des études portant sur l'éducation du comportement oculaire.

Cette revue de la littérature a permis de tirer plusieurs enseignements qui ont nourri les réflexions tout au long de la thèse. Les paragraphes suivants détaillent les deux principaux points que nous avons retenus : (i) une taxonomie des méthodes existantes et leurs limites, ainsi que (ii) trois étapes essentielles à réaliser pour pouvoir éduquer correctement le comportement oculaire d'une personne dans une situation donnée.

1.2.2.1 Taxonomie des méthodes existantes et leurs limites

A l'instar de Causse (2016, pp. 154-157), nous avons identifié plusieurs types de méthodes d'éducation du comportement oculaire. Nous proposons de les classer dans trois catégories principales : (1) les méthodes *naturelles*, (2) les méthodes de *guidage*, et (3) les méthodes de *feedbacks*. Cette partie décrit plus précisément ces trois catégories ainsi que leurs principales limites. Un tableau synoptique (tableau 1, p. 45) présente un classement de l'ensemble des études citées dans ces trois catégories.

Les méthodes d'éducation naturelles : les méthodes que nous appelons *naturelles* consistent en la pratique de certains exercices qui modifient « naturellement » (avec de l'entraînement) le comportement oculaire de la personne qui les réalise. Pour ce type d'éducation, les modifications du comportement oculaire sont donc induites sans explications supplémentaires sur le comportement oculaire. Les nombreux travaux sur les différences de comportement oculaire experts/novices (Fitts, Jones & Milton, 1950 ; Bellenkes *et al.* 1997 ; Rayner, 1999 ; etc.) illustrent bien ce phénomène car ils mettent en lumière l'influence de la pratique intensive d'une

tâche (l'expertise) sur le comportement oculaire. La mise en place d'exercices garantissant l'éducation du comportement oculaire souhaité semble néanmoins être une des difficultés de ce type de méthode. C'est pourquoi cette démarche nécessite généralement de concevoir des exercices adaptés aux modifications recherchées, exactement comme l'ont fait Shapiro et Raymond (1989). Grâce aux évolutions technologiques, il est également possible d'intégrer l'utilisation d'*eye trackers* dans la conception de ces exercices, afin de créer des exercices nécessitant l'interaction avec le regard. Dans la littérature sur les applications des *eye trackers*, ce type d'interface est dite *gaze-contingent* (Duchowski, 2002) car l'interface est modifiée par la position du regard. Le jeu utilisé par Wass *et al.* (2011), qui mettait en scène un papillon disparaissant dès qu'il était regardé par les enfants, en était un exemple. Il est donc possible de concevoir de petits exercices, *gaze-contingent* ou non, permettant de modifier le comportement oculaire des personnes les pratiquant. Il est également à noter que plus la tâche choisie sera complexe et plus le temps de pratique nécessaire à la modification du comportement oculaire risque d'être long.

Les méthodes d'éducation par le guidage (*i.e. Education par l'exemple*) : les méthodes de *guidage*, centrées sur l'enseignement du modèle à atteindre, ont comme principe de prodiguer des informations de différentes formes sur le comportement à acquérir. Ces informations sont généralement données en amont de la pratique de la tâche concernée, c'est pourquoi on parle généralement de guidage ou, en anglais, de *feedforward*. Cette connaissance du comportement à adopter permet à l'apprenant de s'en inspirer dans sa pratique personnelle, mais aucun conseil personnalisé ne lui est délivré par la suite.

La présentation de ce modèle peut être faite de différentes manières en variant la modalité de présentation (orale, visuelle, etc.), le dynamisme de la présentation (statique, dynamique, hybride), la nature de l'information et le type de visualisation lorsque cette information est visuelle. Ainsi, les différentes visualisations des données oculaires pourraient être envisagées pour présenter le comportement oculaire à adopter. Dans cette optique-là, la revue des visualisations de données

oculaires réalisée par Blascheck *et al.* (2014) permet de voir la majorité des visualisations possibles (voir aussi la visualisation du *Bundling* : Hurter, Tissoires & Conversy, 2009 ; Hurter, Ersoy, Fabrikant, Klein & Telea, 2013 ; Lhuillier, Hurter, & Telea, 2017).

Ce type de méthodes a comme principe la présentation, sous différentes formes, d'un comportement à adopter, afin qu'il soit suivi, reproduit et appris. Dans les exemples exposés, ce comportement à adopter correspondait à un circuit visuel à réaliser dans une situation donnée. Pour que le suivi ou la reproduction de ce comportement aient du sens, il était nécessaire que l'apprenant soit confronté exactement à la même situation que celle rencontrée lors de l'enregistrement du *circuit visuel de référence*. Ces méthodes sont donc principalement limitées à des situations pouvant être reproduites à l'identique. Ainsi cela semble particulièrement adapté aux situations statiques (inspection visuelle d'avion, de radiologie, etc.) et aux situations dynamiques non interactives comme les films ou séquences vidéo.

Les méthodes d'éducation par le feedback : Un dernier type de méthodes d'éducation se focalise davantage sur l'analyse du comportement oculaire de l'apprenant. La connaissance du comportement oculaire à adopter (*i.e.* de référence) est essentielle ici encore. En effet, par comparaison de ce comportement oculaire avec celui de l'apprenant, cela permet d'identifier des différences qui sont autant de points à améliorer pour cet apprenant. Il est alors possible de fournir un feedback personnalisé à ce dernier afin que son comportement oculaire tende vers celui de référence. Pour autant, ce comportement de référence n'est pas montré à l'apprenant, il ne sert que pour la comparaison avec son propre comportement.

Concernant ce dernier type de méthodes, nous avons identifié dans la littérature trois façons différentes d'analyser le comportement oculaire de l'apprenant. La première est une analyse *a posteriori*, la deuxième est une analyse en temps réel mais réalisée manuellement par un opérateur humain et enfin, la dernière est une analyse

en temps réel automatisée par une machine. Ces trois types d'analyse comportent des limitations spécifiques.

Analyse a posteriori : lorsque l'analyse est réalisée à la fin d'un essai ou d'un test, et que l'objectif est de donner rapidement du feedback à la personne venant d'être observée, il est essentiel que le traitement des données soit bref. Ainsi, ce type de méthode semble adapté aux situations relativement simples avec des durées d'enregistrement courtes. Becic *et al.* (2008) ont par exemple réalisé leur étude sur une tâche de recherche visuelle relativement simple durant au maximum 8 secondes.

Analyse en temps réel manuelle : les méthodes pour lesquelles l'analyse en temps réel est réalisée par un opérateur humain, nécessitent tout d'abord que cet opérateur soit un expert de la situation concernée. En effet, il est essentiel d'avoir les connaissances adéquates pour percevoir les mauvais comportements et fournir un feedback adapté. La présence d'un expert est donc requise mais cela implique également que ce dernier utilise ses ressources attentionnelles pour analyser le comportement oculaire et identifier des mauvais comportements au détriment de la surveillance des autres composantes de l'activité. Néanmoins, ce type de méthodes, très coûteuses à cause de cette mobilisation d'un expert, a l'avantage de pouvoir être utilisé sur n'importe quelle situation, statique comme dynamique, simple comme complexe.

Analyse en temps réel automatisée : ce dernier type de méthodes d'éducation propose de fournir un feedback en temps réel sans mobiliser d'expert pour analyser le comportement de l'apprenant. En effet, cette analyse est réalisée automatiquement par une machine. Bien que cela semble dépasser la limitation principale de l'analyse manuelle par un expert, certaines limitations ont été relevées. La seule étude que nous avons identifiée dans cette catégorie (Wang *et al.* 2015) a automatisé une analyse très spécifique. Cette analyse consistait à comparer en temps réel, la position du regard du participant avec un comportement de référence correspondant à la juxtaposition des circuits visuels de plusieurs personnes. Cela nécessitait ici encore, que les participants soient exactement dans

les mêmes conditions que celles des personnes dont les circuits visuels composent le comportement de référence. A l'instar des méthodes d'éducation par l'exemple, cela est adapté aux situations statiques ou reproductibles à l'identique (e.g. séquence vidéo). De plus, cela nécessite un lourd travail en amont pour modéliser le comportement de référence afin de permettre la comparaison en temps réel.

Couplage de différents types de méthodes d'éducation

Il est également possible de mélanger plusieurs types de méthodes pour éduquer le comportement oculaire. Par exemple, la méthode utilisée par Wilson *et al.* en 2011 est un mélange (1) d'une méthode de guidage, et (2) d'un entraînement durant lequel des feedbacks sont fournis à l'apprenant sur son propre comportement oculaire. En effet, la première étape correspond à la présentation et l'explication du comportement oculaire de l'expert à l'aide d'une vidéo augmentée de la position du regard de ce dernier (guidage, éducation par l'exemple). Puis, dans un second temps, il est demandé à l'apprenant de reproduire le comportement qu'il vient de visionner. Pour cela il réalise plusieurs essais et à la fin de chaque essai, un feedback lui est donné sur son comportement. Ce feedback prend d'abord la forme du visionnage de l'essai augmenté de son propre comportement oculaire, puis d'indications orales données par l'expérimentateur (éducation par le feedback).

L'étude de Wilson *et al.* (2011) illustre bien la possibilité de puiser dans les différentes méthodes d'éducation pour répondre à des besoins spécifiques. Toutefois les méthodes existantes ont des limitations qu'il est nécessaire de cerner afin de guider le choix d'une méthode par rapport à une autre. Le fait d'utiliser de manière combinée différentes méthodes d'éducation doit pouvoir permettre de dépasser certaines limitations mais, à notre connaissance, aucune validation expérimentale ne permet d'en attester.

La page suivante présente un tableau classant les études citées à l'aide de la taxonomie proposée. Les paragraphes suivants détaillent les trois étapes essentielles à réaliser pour pouvoir éduquer correctement un comportement oculaire.

Méthodes d'éducation naturelles (Éducation par la pratique d'exercices)		
<i>Type d'exercice</i>	<i>Description</i>	<i>Limites</i>
Exercices spécifiques	Tâches conçues pour favoriser le développement de certains comportements oculaires. (Shapiro & Raymond, 1989)	<ul style="list-style-type: none"> • Conception et contrôle des tâches d'entraînement coûteux • Durée d'éducation plus longue • Education très spécifique et non réutilisable
Exercice Gaze-contingent	Tâches dont certaines interactions sont réalisées à l'aide de la position du regard (Wass <i>et al.</i> , 2011)	
Méthodes d'éducation par le guidage (Éducation par l'exemple)		
<i>Type de transmission</i>	<i>Description</i>	<i>Limites</i>
Explications orales	Indications des endroits qu'un expert regarderait durant le visionnage d'une vidéo (Jarodzka <i>et al.</i> , 2012)	<ul style="list-style-type: none"> • Adapté aux situations pouvant être reproduites à l'identique : les situations statiques ou dynamiques non interactives
	Explications orales de la stratégie des experts modélisée. (Wilson <i>et al.</i> , 2011)	
Visualisations statiques	Sur impression du circuit visuel des experts (Sadasivan <i>et al.</i> , 2005 ; Nalanagula <i>et al.</i> , 2006)	
Visualisations dynamique	Affichage d'un curseur (cercle) reproduisant le circuit visuel des experts à vitesse réelle (Jarodzka <i>et al.</i> , 2012 ; Wilson <i>et al.</i> 2011) ou ralentie (Nalanagula <i>et al.</i> , 2006)	
	Mise en saillance des endroits regardés par les experts et floutage/assombrissement des zones non regardées. (Jarodzka <i>et al.</i> , 2012)	
	Mise en saillance des endroits regardés par les experts et floutage/assombrissement des zones non regardées <i>géré manuellement</i> par l'expérimentateur en fonction de l'avancée de l'apprenant (Vine <i>et al.</i> , 2012)	
Visualisations hybrides	Affichage d'un curseur reproduisant le circuit visuel à vitesse ralentie et traçant statiquement les déplacements précédemment effectués (Nalanagula <i>et al.</i> , 2006)	
Méthodes d'éducation par le feedback (Analyse du comportement oculaire de l'apprenant)		
<i>Type d'analyse</i>	<i>Description</i>	<i>Limites</i>
Post-traitement	Analyse de la stratégie visuelle à l'aide d'un <i>eye tracker</i> . Indications orales données en fonction de la stratégie visuelle identifiée précédemment. (Becic <i>et al.</i> , 2008) Type de feedback : <i>feedback terminal</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Adapté aux situations pour lesquelles les stratégies visuelles sont connues et identifiables. • Adaptées à des changements simples et radicaux dans la stratégie visuelle
Temps réel	Affichage en temps réel de la position du regard de l'élève sur un écran, analyse et indications orales faites par un observateur humain. (Wetzel <i>et al.</i> , 1998 ; Wilson <i>et al.</i> , 2011) Type de feedback : <i>feedback en ligne</i>	
	Mise en saillance des endroits pertinents et floutage/assombrissement des zones non pertinentes à chaque fois que l'apprenant regardait trop loin de ces endroits pertinents. (Wang <i>et al.</i> , 2005) Type de feedback : <i>feedback en ligne hors limites</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Adapté aux situations statiques ou reproductibles à l'identique (<i>i.e.</i> séquence vidéo). Nécessite un lourd travail en amont pour modéliser le comportement de référence.

Tableau 1 - Synthèse des méthodes identifiées et de leurs limitations, présentées par catégories de la taxonomie proposée (naturelles, guidage, feedback).

1.2.2.2 Démarche générale à respecter pour réaliser l'éducation du comportement oculaire

Malgré leurs disparités et les différences de terrain, toutes ces études semblent partager une trame commune. Celle-ci se définit en trois étapes successives : (1) l'identification et la modélisation du comportement oculaire souhaité (comportement de référence) ; puis (2) la mise en place des méthodes d'éducation afin de modifier le comportement naturel de différentes personnes (élèves, enfants, etc.) vers ce comportement de référence et enfin (3) l'observation des bénéfices que cela procure à ces apprenants lors de la pratique de la tâche concernée.

Etape 1 : Définition du comportement de référence - La première étape consiste à définir la nature du comportement efficace dans la situation concernée. Il est parfois possible de modéliser théoriquement le comportement le plus efficace à mettre en œuvre dans une situation donnée. Cependant, lorsque cette modélisation théorique n'est pas possible, il est courant de considérer le comportement de l'expert comme celui de référence. Ainsi de nombreux chercheurs ont observé le comportement oculaire des experts sur des tâches très variées, que ce soit le jeu d'échecs (Reingold, Charness, Pomplun & Stampe, 2001), les problèmes de mathématiques ou de physique (De Corte, Verschaffel et Pauwels, 1990 ; Suppes, 1990 ; Hegarty, Mayer & Green, 1992), la conduite automobile (Mourant & Rockwell, 1972 ; Chapman & Underwood, 1998), le basket-ball (Vickers, 1996 ; Ripoll, Bard & Paillard, 1986), le baseball (Bahill & Laritz, 1984), les jeux vidéo (Shapiro & Raymond, 1989), la lecture (Rayner, 1998), la lecture de partition de piano (Land & Furneaux, 1997), l'escalade (Nieuwenhuys, 2008) ou encore le pilotage d'avion (Fitts, Jones & Milton, 1949 ; Bellenkes, Wickens, Kramer, 1997 ; Kasarskis, Stehwien, Hickox & Aretz, 2001 ; etc.). Il en ressort qu'avec la pratique et l'expérience, les personnes acquièrent un comportement oculaire différent en lien avec la tâche qu'ils réalisent. Chaque tâche visuelle aurait donc un comportement oculaire optimal lui étant propre, et étroitement lié à la possibilité de réaliser de meilleures performances. Rayner (1998) concluait sa revue de littérature de vingt ans de recherche sur les mouvements des yeux dans la lecture, en avançant qu'il serait certainement peu approprié de faire

des généralisations de comportements oculaires d'une tâche à une autre. La première étape pour éduquer le comportement oculaire d'une personne est donc généralement l'observation du comportement de l'expert dans la situation cible ainsi que sa modélisation. Cela permet de définir un modèle à atteindre, un comportement de référence, sans pour autant connaître *a priori*, le meilleur chemin permettant de l'atteindre (*i.e.*, les situations d'apprentissage).

Etape 2 : Modifier durablement le comportement oculaire - Cette deuxième étape concerne les personnes pour lesquelles il a été jugé que l'apprentissage du comportement oculaire de référence pourrait être bénéfique. Dans la majorité des cas, cela concerne donc des personnes non-expertes que nous nommerons, par abus de langage, des **novices**.

Ainsi, connaître le comportement de référence permet de réfléchir à une stratégie pour éduquer le comportement oculaire de ces novices (Bellenkes *et al.*, 1997), c'est-à-dire pour réussir à modifier durablement leur comportement oculaire dans une certaine direction. Pour cela, différentes méthodes d'éducation peuvent être utilisées. Comme toute habileté motrice, la spécificité du comportement oculaire à atteindre doit guider le choix des exercices et des indications donnés à l'apprenant. Tirer un lancer-franc au basket ne demande pas d'apprendre les mêmes types de mouvements que le passage de haies en athlétisme. Concernant le comportement oculaire, les différentes études citées dans la partie précédente démontrent qu'il y a, à l'heure actuelle, autant d'études que de méthodes d'éducation du comportement oculaire ou inversement. Aucune validation expérimentale ne permet de préconiser formellement une méthode d'éducation plutôt qu'une autre. Cette étape consiste ainsi à choisir une méthode d'éducation du comportement oculaire adaptée à la situation concernée.

Etape 3 : Observer les effets sur la situation cible - Réussir à modifier le comportement oculaire d'une personne ne signifie pas pour autant que cela va lui apporter un bénéfice lors de la réalisation de la tâche souhaitée. Certains éléments semblent conditionner l'apport de bénéfices dans une situation donnée. En effet, il faut que la modification comportementale soit pertinente pour la réalisation de la

tâche sinon, comme dit précédemment, cela n'aura aucun effet, voir des effets négatifs liés à l'acquisition de mauvaises habitudes. Lorsque l'éducation du comportement oculaire se fait sur une autre situation que celle visée (*e.g.* via des petits exercices à l'instar de Shapiro et Raymond, 1989), il faut également pouvoir contrôler que l'apprentissage se transfère correctement. Afin de vérifier ces différents éléments, il est nécessaire de réaliser des expérimentations visant à observer les effets liés à l'apprentissage de ce nouveau comportement oculaire. L'apprentissage d'un nouveau comportement oculaire est classiquement défini comme bénéfique dès lors qu'il permet d'obtenir une meilleure performance à la tâche cible, ou qu'il permet de réaliser la tâche dans de meilleures conditions en termes de gestion des ressources (mentales, physiques, temporelles, etc.).

Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans le courant des études appliquées portant sur l'éducation du comportement oculaire. L'analyse des travaux antérieurs réalisés dans ce domaine nous a notamment permis d'identifier et de décrire ce qui semble être une démarche générale à suivre pour éduquer le comportement oculaire. C'est donc tout naturellement que nous avons fait le choix de respecter également ces trois étapes. Pour autant, les méthodes d'éducation utilisées jusqu'à présent ne permettent pas de répondre à nos besoins (*i.e.* non adaptées à la situation de pilotage) et nous avons ainsi dû penser une nouvelle manière d'éduquer le comportement oculaire afin de dépasser les limitations actuelles.

Le chapitre suivant portera sur l'application de ces trois étapes dans le contexte spécifique du pilotage. Nous présenterons (1) une description et une modélisation du comportement des experts-pilotes (comportement de référence), (2) la nouvelle manière d'éduquer le comportement oculaire que nous proposons ainsi que le travail informatique réalisé pour permettre son évaluation et enfin, (3) les points sur lesquels nous pensons que notre méthode permet d'apporter des bénéfices pour l'activité de pilotage.



Chapitre 2

Application de la démarche d'éducation du comportement oculaire au contexte du pilotage

Afin de nous inscrire pleinement dans le courant de l'éducation du comportement oculaire, nous avons souhaité respecter les trois étapes identifiées (cf. 1.2.2.2) lors de l'analyse des travaux antérieurs du domaine, à savoir : (1) la modélisation du comportement oculaire de référence, (2) l'utilisation d'une méthode d'éducation du comportement oculaire afin de tendre vers le comportement de référence et enfin, (3) l'évaluation des bénéfices de cette éducation. Ce chapitre décrit les travaux réalisés dans le cadre de ces trois étapes.

2.1 Etape 1 : la modélisation du comportement de référence

Cette partie concerne la première étape de notre démarche qui était consacrée au comportement oculaire à atteindre par les élèves pilotes *ab initio*. Comme dans une majorité des cas, le comportement considéré comme optimal est celui de l'expert-

pilote. À l'heure actuelle, et comme expliqué p.25, caractériser le comportement oculaire précis des experts, tel qu'un circuit visuel, n'a pas de sens en tant que comportement de référence dans la situation dynamique et complexe du pilotage. Ainsi, tous les résultats permettant de décrire les caractéristiques plus générales du comportement oculaire des pilotes-experts sont détaillés ci-après.

2.1.1 Caractéristiques du comportement oculaire des pilotes experts

Dans le pilotage, les experts ont un comportement oculaire qui se différencie de celui des novices sur de nombreux aspects. La première étude intégrant l'analyse systématique du comportement oculaire et utilisant le paradigme expert-novice fut réalisée par Fitts, Jones et Milton en 1949. Dans cette étude les auteurs ont cherché à comprendre comment les pilotes récupéraient de l'information par le regard, et quelles étaient les difficultés liées au design du cockpit ou à l'expérience de pilotage. Pour cela, ils ont étudié 40 pilotes de l'US Air Force durant des atterrissages aux instruments (Instrument Flight Rules, IFR) en simulation à l'aide d'un appareil photo récupérant 8 fois par seconde la position des yeux. Les résultats montrent que les experts font plus de fixations, des fixations plus courtes sur les différents instruments et qu'ils regardent plus fréquemment les informations pertinentes.

Bien que ces résultats aient été obtenus de manière moins précise que ne le permettent les appareils développés depuis (*e.g.* EyeLink1000 à 1000Hz), ils n'en restent pas moins valides. En effet, ces résultats ne cessent d'être répliqués. Les différentes études conduisant à des résultats similaires ont également apporté des précisions grâce à la qualité de leurs appareils de capture et à l'originalité de leurs travaux.

Au début des années 1970, Miller (1973) étudia les changements induits par l'entraînement sur le comportement oculaire d'élèves-pilotes, à différents moments de leur formation et en comparaison avec des experts. Sur une tâche d'atterrissage aux instruments (IFR) simulée, ils ont observé que les experts réalisaient également,

plus de fixations, des fixations plus courtes et plus fréquentes sur les instruments pertinents.

De manière un peu différente, Kramer *et al.* (1994) ont étudié l'existence d'une correspondance entre l'expérience de vol et le comportement oculaire des pilotes. Pour cela, des élèves pilotes, des instructeurs avec peu d'expérience et des instructeurs avec beaucoup d'expérience ont réalisé un vol aux instruments IFR en simulateur. Les résultats montrent que les experts font des fixations plus courtes et qu'ils regardent plus fréquemment les éléments pertinents. Des résultats complémentaires ont d'ailleurs montré que certaines mesures du comportement oculaire (*e.g.* fréquence de regard sur certains instruments) étaient pertinentes pour l'évaluation du niveau d'expertise car elles permettaient de mieux discriminer les pilotes par rapport aux mesures de performance de vol.

Dans la lignée de ces travaux, Bellenkes *et al.* (1997) ont répliqué et étendu une partie de l'expérimentation faite par Kramer *et al.* (1994) afin d'étudier les différences dans le contrôle de l'attention, en fonction de l'expertise et de la difficulté des manœuvres à réaliser durant un vol IFR en simulateur. Dans cette étude, sans surprise, les experts font également plus de fixations, des fixations plus courtes et plus fréquentes sur les instruments, notamment sur les instruments pertinents. Les résultats ont également montré que lorsque la difficulté augmente, les experts ont un comportement oculaire de moins en moins homogène, ce qui semble traduire une meilleure adaptation à la situation. Cette adaptation permettrait de réagir de manière plus flexible à la situation et d'aboutir à une meilleure performance.

En 1999, Ottati, Hickox et Richter ont cherché à récolter des données permettant d'améliorer la conception des cartes de navigation 3D et la formation des pilotes-novices. Pour cela, ils ont étudié le comportement oculaire de deux groupes de cadets de l'US Air Force variant en expérience durant un vol à vue (Visual Flight Rules, VFR) en simulateur, au cours duquel plusieurs types de terrain étaient survolés. Les résultats des analyses du comportement oculaire ont montré que le groupe le plus expérimenté faisait plus de fixations, mais aucune différence n'a été trouvée quant à la durée de ces fixations. Ce dernier résultat va à l'encontre de ce

qui était attendu par les auteurs. Selon eux, le faible écart d'expérience différenciant les deux groupes (seulement 45h environ) expliquerait ce résultat.

Toujours en vol à vue (VFR), Kasarskis *et al.* (2001) ont analysé les différences expert/novice durant des atterrissages en simulateur afin de fournir des pistes pour améliorer la formation de pilotage et réduire les accidents à l'atterrissage. Les résultats de Fitts *et al.* (1949) sont une nouvelle fois répliqués et des résultats complémentaires montrent que les experts ont un comportement oculaire plus régulier et défini que les novices. En séparant les bons atterrissages des mauvais dans les deux groupes, ils ont également observé que les pilotes réalisaient plus de fixations lors des bons atterrissages et que cette différence était particulièrement importante chez les experts.

De la même manière, dans le cadre du pilotage d'hélicoptère, Sullivan, Yang, Day et Kennedy (2011) ont étudié la possibilité d'améliorer l'entraînement sur simulateur en analysant l'influence de l'expérience sur le comportement oculaire. Les résultats ont montré que plus un pilote est expert et plus sa durée moyenne de fixation diminue, sa fréquence de fixation sur la carte et l'extérieur (Out of The Windows, OTW) augmente et la proportion de temps à regarder l'OTW diminue.

Enfin Xiong, Wang, Zhou, Liu et Zhang (2016) ont cherché à analyser le comportement oculaire de pilotes experts et novices lors d'atterrissages en vol à vue (VFR) simulés. Comme dans les études citées précédemment, les résultats ont montré que les experts faisaient plus de fixations et des fixations plus courtes. Grâce à l'évolution des *eye trackers*, les saccades ont été également étudiées et montrent que les experts font des saccades plus grandes et plus rapides, et que la taille de leurs pupilles varie moins.

Depuis les années 1950, des efforts considérables ont été faits pour déceler les différences de comportement oculaire experts/novices dans le pilotage d'avion. Ces études ont permis de cerner les principales différences des caractéristiques du comportement oculaire des pilotes expérimentés et celui des pilotes novices. À la lumière de ces nombreuses études, il est apparu pertinent de proposer une

modélisation des caractéristiques du comportement oculaire des experts-pilotes afin de tenter d'organiser ces nombreux résultats. Cela permettra de constituer ce que nous considérerons comme le comportement oculaire de référence dans la situation de pilotage, nécessaire à la réalisation des étapes 2 et 3 de la démarche d'éducation du comportement oculaire.

2.1.2 Proposition de modélisation du comportement oculaire sur la base des caractéristiques essentielles identifiées

Le comportement oculaire correspond à la manière dont les pilotes récupèrent des informations par le regard. La modélisation du comportement oculaire que nous proposons synthétise la grande majorité des résultats autour de cinq caractéristiques de la récupération d'informations visuelles. Pour cela, nous nous sommes basés sur le vocabulaire utilisé par les instructeurs de l'Armée de l'air. Ainsi, nous avons classé les différences de comportement oculaire entre les experts et les novices selon les caractéristiques suivantes : la vitesse, la fréquence, la pertinence, la structure et la flexibilité.

Comparé aux novices, les experts font plus de fixations, des fixations plus courtes et des saccades plus rapides. Cela peut se traduire par une **vitesse** de récupération des informations (Xiong *et al.*, 2016) qui est plus élevée pour les experts. Les experts font également plus fréquemment des fixations sur les différents éléments (**fréquence** de récupération des informations) et particulièrement sur les instruments pertinents, ce qui se traduit par un temps total de fixation, *dwell time*, plus grand sur ces instruments (**pertinence** des informations récupérées). Le dernier point concerne l'organisation de la récupération d'informations de l'expert qui semble être plus clairement structurée lorsque l'environnement est prévisible (**structure** de la récupération d'informations) (Kasarski *et al.* 2001) et plus flexible lorsque la situation est plus incertaine (**flexibilité** de la récupération d'informations) (Bellenkes *et al.* 1997). La figure 8 met sous forme graphique la modélisation que nous proposons, permettant ainsi de caractériser le comportement oculaire

standard d'un expert et d'un novice. Cette modélisation permet également de constituer une base pour imaginer des méthodes d'éducation oculaire efficaces permettant aux novices d'évaluer et de suivre leur progression sur ces caractéristiques de leur comportement oculaire.

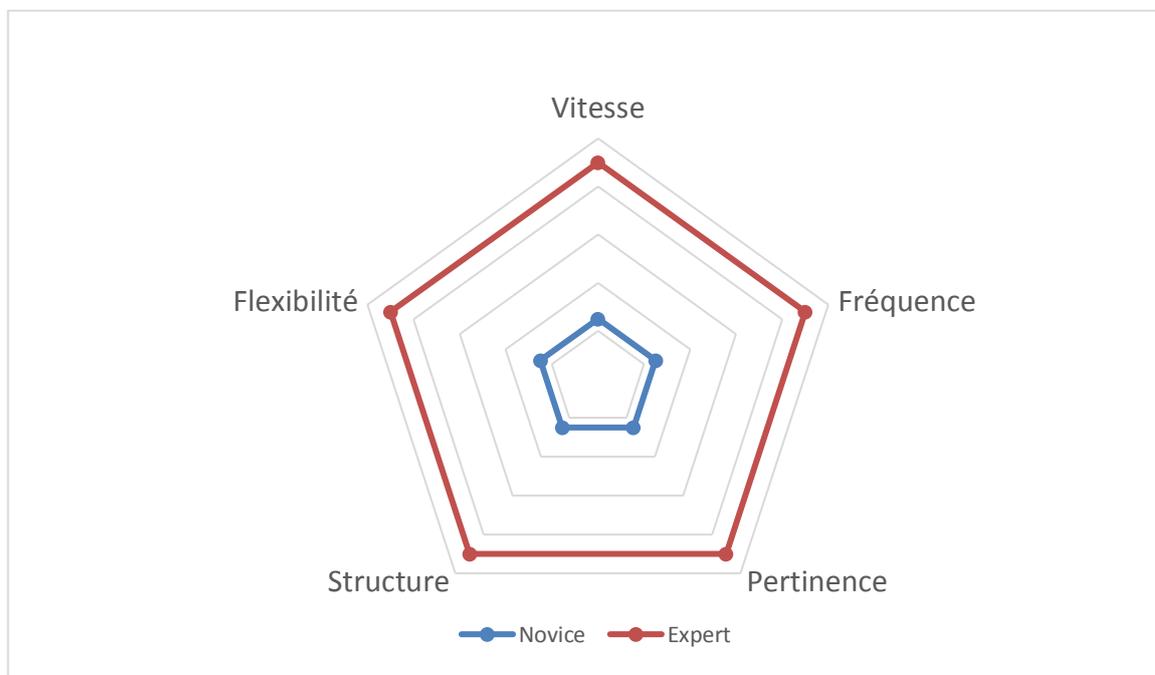


Figure 8 – Graphique présentant la modélisation proposée du comportement oculaire comprenant 5 caractéristiques (vitesse, fréquence, pertinence, structure et flexibilité). Sur ce modèle, nous avons modélisé les caractéristiques des pilotes experts (rouge) et des novices (bleu).

2.1.3 Caractéristiques pertinentes à éduquer

L'idée que l'éducation du comportement oculaire serait bénéfique pour le pilote-novice s'accompagne souvent de l'idée que ces novices devraient apprendre par mimétisme du comportement oculaire de l'expert (Kramer *et al.*, 1994). Cependant pour des élèves pilotes *ab initio*, n'ayant donc pas encore appris à piloter, nous pensons que la reproduction *exacte* du comportement de l'expert n'est pas entièrement pertinente. Certaines informations sont notamment données par l'environnement et permettent à un pilote expérimenté de connaître, par exemple, le régime moteur au bruit de l'avion, d'avoir une estimation de sa vitesse au défilement des paysages, de sentir une perte d'altitude en virage grâce à ses sensations proprioceptives, etc. De fait, l'acquisition de ces informations a un impact

sur leur comportement oculaire puisqu'ils sont en mesure de les obtenir sans avoir à regarder les instruments. Ainsi, demander à un pilote novice de répéter le même comportement oculaire qu'un expert, lui ferait négliger des informations nécessaires au maintien d'une bonne conscience de la situation. La pertinence et l'organisation (structure), au sens de notre modélisation de la récupération des informations visuelles, nécessitent donc des connaissances spécifiques au pilotage et à l'aéronautique que le pilote-novice n'est pas censé encore maîtriser. L'influence des connaissances expertes sur le comportement oculaire, comme démontré également pour le jeu d'échecs (De Groot, 1965), est un élément que nous avons pris en compte. C'est pour cela que nous préconisons, dans le cadre du pilotage, d'éduquer prioritairement les trois caractéristiques restantes de notre modèle : la vitesse, la fréquence et la flexibilité.

La vitesse et la fréquence correspondent à la manière de regarder les éléments. Ce sont les composantes essentielles du maintien d'une bonne conscience de la situation. En effet, la situation de pilotage étant dynamique, elle évolue constamment et il faut donc rapidement et fréquemment mettre à jour la connaissance de l'attitude et de l'état de la situation de l'avion.

La flexibilité de l'organisation de la récupération des informations est une des composantes essentielles d'une bonne adaptation aux évolutions, prévisibles ou non, de la situation de pilotage (Bellenkes *et al.*, 1997). A l'inverse, il est possible de développer des habitudes non flexibles, des routines. Wickens (2002) avançait que les éléments renforçant la performance de routine devraient inhiber la conscience de la situation créant ainsi une 'tunnellisation attentionnelle' dirigée principalement sur les tâches et événements attendus. Cela signifie que, lorsque le pilote est enfermé dans une routine, il n'est attentif qu'aux évolutions de la situation qu'il a l'habitude de rencontrer et peut omettre le traitement d'événements non habituels. Même l'apprentissage des pannes (événements imprévisibles) se fait parfois en mécanisant les procédures à réaliser pour résoudre les problèmes les plus fréquents. Ce type de pratique tend à augmenter la performance lorsque les pannes connues surviennent

mais n'est pas la garantie d'une bonne performance aux pannes rares non travaillées. Il faut donc prévenir l'automatisation de routines au profit d'une récupération des informations organisée mais flexible. Jodlowski, Doane et Brou (2003) ont réalisé une expérimentation qui illustre cette problématique. Dans cette étude, ils ont testé la capacité de pilotes, d'expérience variable, à s'adapter à une situation non routinière. Ces pilotes ont réalisé un vol au cours duquel les instruments étaient soit fonctionnels soit défectueux (pannes). Les pannes n'étaient pas toutes annoncées afin d'évaluer les participants sur des situations, censées être rares, qu'ils n'ont pas l'habitude de rencontrer. Les résultats ont montré que les experts étaient meilleurs lors des parties correspondant à des situations qu'ils avaient l'habitude de rencontrer, mais leur performance se situait à la hauteur de celle des novices pour les segments comportant une panne non-annoncée. Selon les auteurs, cela serait dû, avec l'expérience, au développement d'habitudes de routines. Ces routines seraient la cause de leur faible performance lors de la résolution de pannes non annoncées. La flexibilité du circuit visuel est donc une composante importante à éduquer chez le pilote-novice afin qu'il ne s'enferme pas trop dans des routines et qu'il s'adapte mieux aux situations qu'il rencontre.

Par ailleurs, l'activité de pilotage, de par sa complexité, demande beaucoup de ressources cognitives aux pilotes. Au début de leur formation, ces derniers sont soumis à une forte charge liée aux compétences qu'ils tentent d'acquérir et à la nature exigeante de la situation. Dans de telles conditions, il est courant que des stratégies visuelles non optimales soient développées par les apprenants (Gopher *et al.*, 1994). Ce début de formation constitue le moment le plus propice pour développer de mauvaises habitudes comme le soulignaient les instructeurs pilotes interrogés par Wetzel *et al.* (1998) dans l'étude présentée au chapitre 1 (cf. 1.2.1). À travers l'éducation du comportement oculaire, il est donc intéressant de chercher à éviter que les élèves ne développent ces mauvaises habitudes. Comme expliqué précédemment, la mauvaise habitude la plus préoccupante concerne la surveillance du ciel en vol à vue (VFR) qui est délaissée au profit de celle des instruments du

cockpit. Ne pas surveiller le ciel est un réel problème pour la sécurité notamment pour éviter les collisions avec d'autres avions (Colvin *et al.*, 2005).

Enfin, une fois leur formation terminée, les pilotes ne bénéficient plus de la présence d'instructeurs ou de système de suivi du regard. Dès lors, il est possible qu'avec le temps, leur comportement oculaire se dégrade. Ce serait notamment le cas dans l'aviation civile, où les pilotes de ligne deviendraient parfois trop confiants dans les fonctions automatisées de leur avion, entraînant une moins bonne surveillance des instruments (Lefrancois, Matton, Gourinat, Peysakhovich, & Causse, 2016). Pour pallier ce problème potentiel, il serait pertinent de développer chez les élèves pilotes, (i) leurs connaissances théoriques sur les comportements oculaires à éviter durant le pilotage d'un avion ainsi que (ii) la conscience de leur comportement oculaire. En renforçant ces deux aspects de la formation, les élèves-pilotes devraient être en capacité de déceler des erreurs dans leur comportement oculaire et ainsi, de pouvoir y remédier.

En résumé, afin d'éduquer de manière optimale le comportement oculaire des élèves pilotes *ab initio*, nous préconisons (1) d'améliorer leur comportement oculaire en améliorant la vitesse, la fréquence et la flexibilité de leur récupération des informations visuelles, tout en (2) leur évitant d'acquérir la mauvaise habitude de trop regarder les instruments et en (3) développant leur capacité à avoir conscience de leur comportement oculaire et de leurs erreurs. Comme expliqué précédemment (cf. 1.2.2), les méthodes existantes ne pouvaient pas convenir puisqu'elles ne sont ni adaptées à la situation de pilotage ni à l'enseignement de caractéristiques génériques du comportement oculaire. La suite de ce chapitre est consacrée à la description d'une méthode originale et innovante que nous avons construite afin de dépasser les limitations actuelles.

2.2 Etape 2 : L'utilisation d'une nouvelle méthode d'éducation du comportement oculaire

Une des principales conclusions du chapitre 1 était que les méthodes d'éducation existantes (cf. 1.2.1) n'étaient pas adaptées à la situation de pilotage du fait de son caractère dynamique et complexe singulier. Un point essentiel de cette thèse a donc été de concevoir et de développer une nouvelle méthode d'éducation compatible avec ce genre de situations. Nous avons élaboré un nouveau paradigme d'éducation du comportement oculaire permettant de nous affranchir des limites actuelles. Cette réflexion a conduit au développement d'un outil informatique, le PilotGazeTrainer (PiGaT), qui met en œuvre cette nouvelle méthode d'éducation du comportement oculaire.

Néanmoins, avant de décrire le principe de ce nouveau paradigme d'éducation ainsi que le PilotGazeTrainer, il est nécessaire d'apporter un éclairage sur la notion de feedback, élément essentiel dans le contexte de l'apprentissage des habiletés motrices. La sous-partie suivante (2.2.1) constitue une petite digression nécessaire à la compréhension du cheminement emprunté au cours de ce travail de thèse. Les notions apportées dans ce cadre-là ont aidé aux choix de conception de cette nouvelle méthode (cf. Chapitre 2, étape 2) et ont été une base importante de réflexion pour orienter la recherche des bénéfices amenés par notre méthode d'éducation du comportement oculaire (cf. Chapitre 2, étape 3).

2.2.1 Les feedbacks : un éclairage utile

Les théories de l'apprentissage du début du XXe siècle telles que la *loi de l'effet* (Thorndike, 1927) avançaient que, dans le cadre d'un apprentissage par essai-erreur, le feedback permettait de favoriser ou d'inhiber la probabilité qu'une personne reproduise un comportement. En effet, une action suivie d'un retour positif et plaisant a plus de chance d'être réitérée (renforcement positif) tandis qu'à l'inverse, une action suivie de conséquences non plaisantes ou négatives tend à ne pas être

reproduite (renforcement négatif). Les travaux expérimentaux menés à partir de cette loi ont permis d'étayer cette théorie. Trowbridge et Cason (1932) ont par exemple modifié et étendu l'expérimentation de Thorndike dans laquelle il était demandé à des participants de tracer des lignes d'une certaine longueur à l'aveugle (les yeux bandés). Dans cette étude, Trowbridge et Cason demandaient de tracer des traits de 3 pouces et à la fin de chaque tracé, un feedback de différente nature était donné pour les groupes expérimentaux ; le groupe contrôle ne recevait pas de feedback. Les résultats ont montré que sans feedback les personnes ne montraient pas de signe d'apprentissage. En effet ils n'avaient aucun moyen de détecter leurs erreurs et de pouvoir les corriger. A l'inverse, lorsqu'un feedback était donné, cela induisait une amélioration rapide qui se maintenait lors des tests de rétention. Une des conclusions tirées de ces travaux était que l'apprentissage moteur ne pourrait se faire que si l'apprenant reçoit un feedback sur son action lui permettant ainsi, d'une manière ou d'une autre, de détecter ses erreurs.

Depuis cette conclusion, les feedbacks sont au centre de l'apprentissage d'habiletés motrices (Schmidt & Debû, 1993) et des termes ont été définis pour faire référence à ces derniers. Lorsque le feedback est donné à la fin d'un essai il est appelé *feedback terminal* et lorsqu'il est donné durant la réalisation de l'essai il est appelé *feedback en ligne* ou en anglais « *concurrent feedback* ». Il est également possible de parler de *bio-feedbacks* (Landers *et al.*, 1991 ; Allen, Harmon-Jones, & Cavender, 2001 ; Janelle, & Hatfield, 2008) lorsque le timing du feedback permet de former des associations entre l'information contenue dans le feedback et les ressentis corporels fins liés à l'activité.

Bien que la plus-value des feedbacks pour l'apprentissage ait été démontrée, certaines limites sont cependant à souligner. La principale dérive identifiée se nomme « l'effet de guidage ». Cet effet correspond à une dépendance au feedback lorsque ce dernier est donné trop souvent (Winstein & Schmidt, 1990 ; Salmoni, Schmidt, & Walter, 1984 ; Camachon, Jacobs, Huet, Buekers, & Montagne, 2007). Cet effet a pour conséquence principale une diminution importante de la performance une fois le feedback retiré, et se traduit également par une activité neuronale

différente (Ronsse *et al.*, 2011). En réponse à cette dérive importante, plusieurs manières de fournir du feedback ont été étudiées afin de trouver un compromis entre la plus-value des feedbacks pour l'apprentissage et le risque de développer une dépendance à ces derniers. Les principales méthodes ayant fait leurs preuves proposaient de donner du feedback en réduisant sa fréquence d'apparition (Winstein & Schmidt, 1990), en donnant un feedback résumant plusieurs essais à la fois (Salmoni *et al.*, 1984), en ne donnant du feedback que lorsque l'erreur dépassait une certaine tolérance/limite (Sherwood, 1988 ; Lee *et al.*, 1990), en laissant l'apprenant choisir la fréquence d'apparition d'un *feedback terminal* (Janelle, Barba, Frehlich, Tennant, & Cauraugh, 1997) ou encore en laissant l'apprenant choisir le moment d'apparition d'un *feedback en ligne* (Huet, Jacobs, Camachon, Goulon & Montagne, 2009). La suite de cette partie décrit succinctement les caractéristiques de ces différentes manières d'administrer du feedback car cela constitue un des éléments essentiels à la conception d'une méthode d'éducation efficace.

Le feedback résumé : Le principe du 'feedback résumé' est de laisser l'apprenant réaliser plusieurs essais sans intervention extérieure et de *debrief* après coup sur les différentes erreurs commises et sur la manière de les corriger à l'avenir. C'est une méthode étudiée initialement par Lavery (1962) qui permet de donner du feedback sur chacun des essais sans risquer un effet de guidage. Généralement, le fait de faire patienter l'apprenant avant de lui donner du feedback occasionne (i) une moins bonne performance durant la pratique (en comparaison avec un entraînement avec un feedback à chaque essai) mais (ii) un meilleur apprentissage visible en test de rétention. Le nombre d'essais à résumer avant de donner le feedback dépend de la complexité de la tâche et de sa durée.

Le feedback atténué – Une autre manière d'éviter l'effet de guidage est d'utiliser le feedback atténué. Cette méthode comprend plusieurs phases, dont la première consiste à commencer l'apprentissage d'une habileté en donnant du feedback à une fréquence élevée voire absolue (100% du temps). Cette première phase a pour but d'amener très rapidement l'apprenant à expérimenter la bonne manière de faire.

Puis, pour éviter que l'apprenant ne devienne dépendant de ce feedback, la fréquence est diminuée. Durant les premiers moments où l'apprenant ne reçoit plus de feedback il se peut que la performance diminue un peu. Dans le cas où cette performance diminuerait trop ou que l'apprenant stabiliserait une manière de faire non optimale, il est possible d'ajuster la fréquence du feedback en l'augmentant à nouveau avant de la redescendre. Cette méthode est intéressante car elle permet de s'adapter à l'apprenant afin qu'il acquière rapidement la bonne manière de faire à l'aide de nombreux feedbacks tout en contrôlant sa restitution sans feedback, évitant ainsi l'effet de guidage.

Le feedback à la demande – Le feedback à la demande est une technique qui a pour principe de laisser l'apprenant choisir la fréquence et parfois le moment d'apparition d'un feedback. L'idée est que l'apprenant demande le feedback lorsqu'il estime en avoir le plus besoin. De cette manière, la fréquence d'apparition du feedback est généralement diminuée, ce qui permet ici aussi d'éviter de développer une dépendance au feedback. Le feedback à la demande a montré des résultats concluants dans le cas de feedback terminal (Janelle *et al.* 1997), et de feedback en ligne (Huet *et al.*, 2009).

Le feedback hors-limite – Enfin, le feedback hors-limite est une autre alternative. Il permet également de réduire la fréquence d'apparition du feedback en ne le donnant que lorsque la performance ou le résultat dépasse une certaine limite de tolérance. Cette limite est souvent fixée par l'entraîneur ou l'enseignant pour les besoins d'un exercice. Généralement cela produit également un feedback atténué. En effet, au début de l'apprentissage, tant que l'habileté motrice n'est pas suffisamment développée et stabilisée, les erreurs dépassant la limite de tolérance sont plus fréquentes. Avec l'entraînement et la pratique, ces erreurs tendent à diminuer, réduisant ainsi la fréquence d'apparition du feedback correspondant. Ce feedback a aussi la particularité d'entraîner du renforcement négatif lorsque des erreurs importantes sont faites puisqu'elles sont immédiatement sanctionnées par l'apparition d'un feedback. L'apprenant devrait donc éviter de reproduire ce

comportement à l'avenir. Dans l'autre sens, lorsque le feedback n'est pas donné, cela produit du renforcement positif puisque l'apprenant comprend que sa réalisation ou sa performance est plutôt bonne. Ainsi cela aide à stabiliser rapidement la performance à la tâche. Enfin, ce type de feedback est souvent riche en signification. En effet lorsqu'un feedback est donné pour dire, par exemple, qu'un lancer était trop court ou trop long, cette information contient en elle-même la direction de la correction à apporter, ce qui est particulièrement important pour un apprentissage optimal.

Nous avons, dans le cadre de ces travaux (cf. 2.2.2), privilégié ce type de feedback qui représentait, selon nous, une manière optimale d'éduquer le comportement oculaire.

Donner du feedback à l'apprenant est donc un élément essentiel d'un apprentissage de bonne qualité. Néanmoins, il est crucial de réfléchir aux modalités d'administration de ce feedback afin de ne le donner ni trop souvent ni trop peu souvent. Donner trop peu de feedback ne permet pas à l'apprenant de corriger rapidement les erreurs qu'il commet, tandis que donner trop de feedback génère d'une addiction envers ce feedback (effet de guidage). Parmi l'arsenal de méthodes étudiées afin d'éliminer l'effet de guidage tout en conservant les bons côtés des feedbacks pour l'apprenant, nous avons sélectionné le feedback hors-limite pour ses propriétés multiples. La partie suivante décrit le principe (*i.e.* positionnement et paradigme) de la méthode originale et innovante d'éducation du comportement oculaire que nous proposons.

2.2.2 Méthode et paradigme proposés pour l'éducation du comportement oculaire

2.2.2.1 Positionnement de notre méthode d'éducation

Par la méthode que nous proposons, nous nous sommes inscrits dans le courant des méthodes d'éducation dont le principe est de fournir un feedback à l'apprenant sur la base de l'analyse de son comportement oculaire. La première étape a été de

choisir entre feedback terminal et feedback en ligne. Dans l'étude de Wetzel *et al.* (1998) portant sur la formation des pilotes de l'US Air Force, les instructeurs-pilotes disposaient d'un écran affichant la position du regard de l'élève durant les vols simulés et durant le débriefing pour rejouer le vol si besoin. L'expérience a montré que les instructeurs ne s'étaient que très peu servis de la fonction *re-jeu* du dispositif d'enregistrement des mouvements du regard de l'élève. Lors du débriefing d'une mission, *i.e.* d'un vol, qui dure environ 40 à 60 minutes, il est difficile de revenir précisément sur les différents moments où le comportement oculaire de l'élève a été incorrect. Les limites de notre mémoire de travail ne nous permettent pas de conserver en détail tous les éléments d'un vol de 40 minutes. Comme ces instructeurs, nous avons choisi d'utiliser du **feedback en ligne** afin de donner de l'information durant la réalisation de la tâche, ce qui est le plus bénéfique pour l'élève-pilote. Dans le contexte opérationnel de la formation initiale de l'Armée de l'air française dispensée à Salon-de-Provence, les instructeurs donnent déjà un peu de feedback durant le vol (simulé ou non) sur le comportement oculaire des élèves. Mais, ils ne disposent pas d'affichage tel que celui décrit dans l'étude de Wetzel *et al.* (1998) et ne peuvent déduire des mauvais comportements oculaires qu'à partir de certains écarts de performance ou d'une attitude incorrecte de l'avion. Cependant lorsqu'ils décèlent ou supputent un comportement oculaire à corriger, ils usent parfois de certains stratagèmes. Par exemple, ils réduisent la luminosité des écrans ou occultent, le temps d'une manœuvre, tout ou partie des écrans avec la carte de navigation ou bien des « post-it » (figure 9). L'objectif des instructeurs est ainsi de faire prendre conscience du bon comportement visuel à adopter aux élèves-pilotes, dans les différentes phases de vol. Toutefois, la surveillance et analyse du comportement oculaire des élèves est une démarche coûteuse qui mobilise les instructeurs au détriment de la surveillance des autres aspects du vol. La formation initiale au pilotage étant une tâche complexe pour les instructeurs-pilotes, nous avons choisi de chercher à automatiser cette surveillance et analyse du comportement oculaire. Il nous fallait proposer une solution technique permettant de fournir du **feedback en ligne** de manière **automatique**.

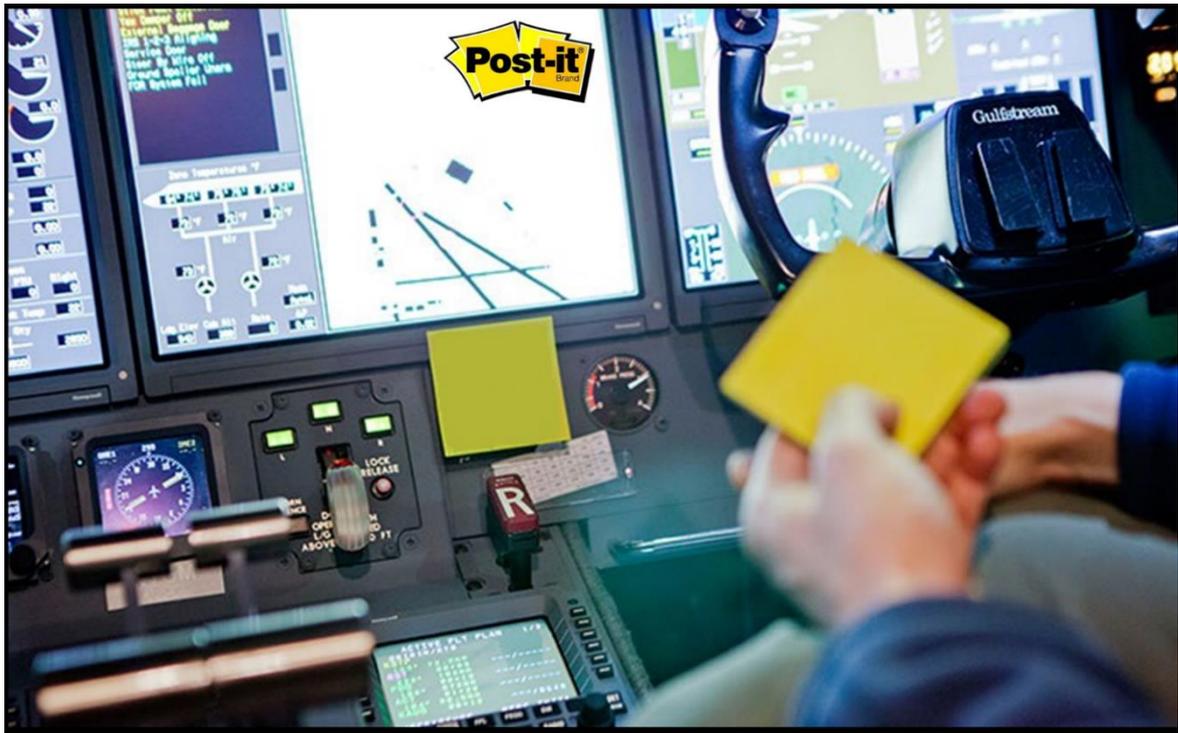


Figure 9 - Exemple de situation dans laquelle un post-it vient cacher un instrument

Dans l'étude de Wang *et al.* (2015) détaillée dans le chapitre précédent (cf. 1.2.1), une solution de cette nature était proposée. En effet, durant le visionnage des séquences vidéo, les participants à cette expérimentation recevaient automatiquement du feedback en fonction de l'endroit où ils regardaient. Pour cela, les auteurs avaient développé une technique permettant (1) d'analyser en permanence la position du regard de la personne sur l'écran, (2) de le comparer à un comportement de référence (juxtaposition de circuits visuels de plusieurs personnes) et (3) de fournir du feedback à chaque fois que le regard de cette personne s'éloignait trop du comportement de référence (*i.e.* assombrissement de la vidéo et mise en saillance de la zone pertinente). Cela correspond à un feedback hors-limite qui pourrait convenir dans notre situation. Cependant, leur manière d'analyser le comportement en temps réel est spécifique à leur situation, non adaptable au pilotage et très coûteuse à mettre en place. Comme expliqué précédemment, comparer deux circuits visuels n'a de sens que si les situations sont strictement identiques, ce qui est incompatible avec le pilotage.

Pour dépasser ces limitations et permettre l'éducation du comportement oculaire sur une tâche dynamique et complexe, l'objectif était de fournir du **feedback en**

ligne de manière **automatisée** sur la base d'une **analyse en temps réel des caractéristiques générales** du comportement oculaire (et non pas d'un comportement oculaire spécifique tel un circuit visuel). Ce dernier point (*i.e.* analyse) constitue réellement l'originalité principale de cette méthode d'éducation, que la sous-partie suivante détaille davantage.

2.2.2.2 Originalité de notre méthode d'éducation : la définition d'un nouveau paradigme

Dans les situations dynamiques et complexes, le comportement oculaire de référence ne peut pas être un circuit visuel, notamment car la situation rencontrée lors de l'enregistrement de ce dernier ne pourra pas être répliquée (cf. 1.2). Nous avons donc décrit le comportement oculaire de référence pour le pilotage à un niveau plus macroscopique, par certaines de ces caractéristiques générales (*e.g.* fréquence de fixation, durée moyenne des fixations, etc.). Nous nous différencions ainsi de la majorité des méthodes d'éducation du comportement oculaire existantes, puisque ces caractéristiques générales ne constituent pas un comportement à reproduire pour l'apprenant, mais des objectifs à atteindre sur les différents aspects qu'elles représentent. Le paradigme d'éducation du comportement oculaire que nous proposons consiste donc : à **modifier les caractéristiques générales d'un comportement oculaire** (*e.g.* augmenter la fréquence de fixation, diminuer la durée moyenne des fixations, etc.) **à l'aide de règles comportementales durant la pratique de la tâche cible**. Ces règles peuvent être vues comme des contraintes artificielles permettant de modifier le comportement oculaire dans une direction donnée durant la réalisation d'une tâche. Par exemple, pour augmenter la vitesse de récupération des informations (au sens de notre modélisation du comportement oculaire), nous pourrions imaginer une règle qui informerait l'apprenant à chaque fois qu'il réaliserait une fixation plus longue que, par exemple, 300ms. Cependant, pour s'assurer qu'une règle comportementale artificielle a l'effet escompté (*i.e.* modification du comportement oculaire souhaitée), il est nécessaire qu'elle soit conçue en lien étroit avec les

caractéristiques du comportement oculaire à adopter. Pour cela, il est nécessaire de décrire quantitativement les caractéristiques générales du comportement de référence. Ces mesures quantitatives pourraient prendre la forme de valeurs-cibles comme par exemple, une durée moyenne des fixations en millisecondes, une fréquence moyenne de fixation en fixations/minute, etc. Cela permettrait de savoir plus précisément ce qu'il faudrait mettre en place comme scénario d'apprentissage (*i.e.* règles comportementales) pour tendre vers un comportement avec de telles caractéristiques générales. Ainsi, l'analyse du comportement de l'apprenant ne se ferait plus en comparaison du comportement de référence, mais consisterait à vérifier que le comportement oculaire de l'apprenant respecte correctement les règles comportementales définies. Dans le cas du non-respect d'une règle, l'apprenant recevrait un feedback (*i.e.* feedback hors-limite) lui indiquant son erreur. La littérature étudiée pour constituer le comportement de référence dans notre contexte (cf. 2.1.1) ne fournit cependant pas toutes les mesures quantitatives dont nous avons besoin pour établir ces règles comportementales. Nous n'avons pas relevé de mesures, utilisables en l'état, sur les caractéristiques de vitesse, fréquence et flexibilité citées précédemment.

L'objectif de cette thèse était bien d'éduquer le comportement oculaire sur toutes les caractéristiques du comportement de référence décrit précédemment. Nous avons cependant dû nous concentrer, le temps des premiers tests que constituent les expérimentations de cette thèse, sur une seule de ces caractéristiques. Ne possédant pas d'objectifs précis pour les caractéristiques de vitesse, fréquence et flexibilité, nous nous sommes focalisés sur un objectif plus pragmatique dicté par les autorités de sécurité des vols. Ainsi, nous nous sommes concentrés sur l'élimination de la mauvaise habitude de regarder trop à l'intérieur du cockpit (*i.e.* « *too much head-down time* ») qui mène à une mauvaise surveillance du ciel. Comme expliqué en introduction, ce problème a entraîné un nombre conséquent d'études qui ont permis la publication de recommandations concernant la répartition du regard à adopter entre la surveillance du ciel et la gestion des éléments du cockpit. Rappelons que

l'agence gouvernementale américaine, la Federal Aviation Administration (FAA), préconise notamment de regarder environ 70% du temps à l'extérieur du cockpit pour voir et éviter les dangers extérieurs (FAA, 1998). Bien que ce soit une description très macroscopique du comportement oculaire, arriver à respecter ce standard nécessite de récupérer les informations rapidement dans le cockpit et de vérifier fréquemment que ces informations évoluent correctement. Cela a donc constitué un premier objectif pertinent pour évaluer la méthode d'éducation que nous proposons. Néanmoins, une des expérimentations réalisées dans le cadre de cette thèse (cf. chapitre 6) a porté sur le recueil de mesures quantitatives des caractéristiques du comportement oculaire de pilotes militaires français à différents niveaux d'expertise. Si les résultats des premiers tests sur l'élimination de la mauvaise habitude sont concluants, nous pourrions ainsi nous intéresser à l'éducation des autres caractéristiques du comportement oculaire de référence.

Une règle régulièrement communiquée en formation de pilotage pour tenter de limiter cette mauvaise habitude est de ne pas regarder plus de deux secondes d'affilée à l'intérieur du cockpit. Dans le cadre de notre méthode d'éducation du comportement oculaire, nous nous sommes ainsi grandement inspirés de la règle des instructeurs (*i.e.* règle des « 2 secondes ») pour constituer la règle comportementale à respecter.

Enfin, le principe de la méthode d'éducation que nous proposons pourrait être résumé ainsi : durant la pratique d'une tâche donnée, (a) donner **automatiquement** du **feedback en temps réel** à l'apprenant, à partir de (b) **l'analyse permanente de son comportement oculaire** et sur la base de **règles comportementales** liées aux **caractéristiques générales du comportement de référence**. Afin de fournir une solution technique permettant de tester cette nouvelle méthode, nous avons développé un outil informatique que nous avons appelé le PilotGazeTrainer. Cet outil logiciel est présenté dans la partie suivante.

2.2.3 Présentation du PilotGazeTrainer

Le PilotGazeTrainer est un logiciel fini dans sa première version fonctionnelle. Cette partie détaille pour la version actuelle de ce dernier, (i) son architecture logicielle, (ii) les utilisateurs identifiés, (iii) ses capacités en termes d'analyse du comportement et de déclenchement de notifications, (iv) son mode de fonctionnement et enfin (v) ses limites.

2.2.3.1 Architecture logicielle du PiGaT

PiGaT a été conçu sous forme de logiciel tournant en tâche de fond sur un PC afin de pouvoir s'adapter à un grand nombre de situations possibles. Le principe de ce logiciel est (1) de recevoir des données provenant d'un *eye tracker* afin (2) d'analyser en permanence le comportement oculaire qui en résulte, puis sur la base d'un (3) scénario contenant des règles comportementales, (4) d'identifier les comportements non souhaités et ainsi (5) déclencher, si nécessaire, des notifications (feedbacks visuels ou sonores).

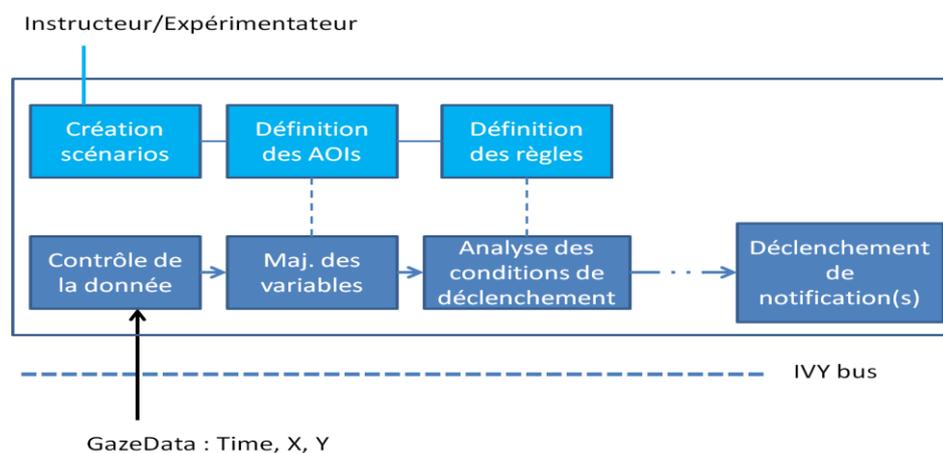


Figure 10. Architecture en composants de l'outil permettant de produire des notifications en temps réel sur la base de l'analyse du comportement oculaire. Les flèches symbolisent le parcours des données oculaires lors de la mise en place d'un scénario. Les composants en bleu clair symbolisent les actions à réaliser par la personne souhaitant mettre en place un scénario d'apprentissage (*i.e.* instructeurs-pilotes ou expérimentateurs). Ces étapes se réalisent en amont et aboutissent à un fichier de configuration du PiGaT. Les composants en bleu foncé correspondent aux étapes automatiquement réalisées par le PiGaT lors de la réception de données oculaires dans le cadre de l'utilisation d'un scénario préalablement défini.

La figure 10 présente l'architecture logicielle du PilotGazeTrainer comprenant sept composants logiciels interconnectés qui montrent comment ces différentes

fonctionnalités ont été découpées (pour une description plus complète des composants logiciels, voir également Dubois, Camachon, Blättler & Hurter, 2016). Ce découpage permet d'avoir une organisation où les différents organes de fonctionnement peuvent être modifiés de manière indépendante. Ainsi les évolutions futures seront intégrées plus facilement.

2.2.3.2 Utilisateurs identifiés

PiGaT a été conçu pour deux types d'utilisateurs bien définis. D'une part c'est un outil d'enseignement et de recherche qui a pour objectif d'offrir à des instructeurs ou à des expérimentateurs une manière simple de créer et de mettre en place des environnements d'apprentissage visant à éduquer le comportement oculaire. D'autre part, le PiGaT est utilisé à l'aide d'un *eye tracker*, par les apprenants placés dans un environnement d'apprentissage préalablement créé. Ces deux utilisations distinctes sont liées par les capacités du système ainsi que par les scénarios d'apprentissage. Ces derniers sont créés dans un premier temps par un instructeur ou un expérimentateur, puis, utilisés dans un second temps par les apprenants. Les capacités du système correspondent aux traitements et analyses des données oculaires permis par PiGaT ainsi qu'aux notifications que ce système est capable de produire en réponse à cette analyse du comportement oculaire. Sur la base des capacités du système, l'expérimentateur ou l'instructeur a accès à une interface permettant de créer des scénarios d'apprentissage qui sont en réalité des règles comportementales associant (a) la détection d'un comportement oculaire à (b) un feedback à produire à chaque détection.

Les parties suivantes détaillent les capacités du PiGaT puis le processus de création des scénarios d'apprentissage et enfin les limites et évolutions prévues du PiGaT.

2.2.3.3 Capacités du PiGaT

Les capacités de ce logiciel correspondent à l'étendue des traitements que ce dernier est capable de faire en termes (i) de réception des données oculaires, (ii) d'analyse du comportement oculaire et (iii) de production de feedbacks.

a) Réception et analyse des données oculaires

Afin de réceptionner les données oculaires, nous nous sommes basés sur l'utilisation d'un bus de données développé à l'ENAC : le bus IVY (Buisson *et al.*, 2002). Le bus Ivy est un protocole de communication accessible au travers de bibliothèques *open-source* de type LGPL (*Lesser General Public License*). Le bus IVY permet à différents programmes de communiquer à travers l'échange de messages-textes. Ces différents programmes bénéficient également d'un mécanisme de découpage automatique des messages basés sur des expressions régulières, ce qui permet de récupérer facilement les différentes informations comprises dans le message-texte.

Pour que le PiGaT reçoive correctement les données oculaires, il faut préalablement s'assurer que les données fournies par le dispositif d'*eye tracking* sont récupérées sans latence, et qu'elles sont correctement envoyées sur le bus IVY dans le format suivant :

« `GazePosition Time=(.*) smoothedCoordinatesX=(.*) smoothedCoordinatesY=(.*)` ».

Mis à part ce formalisme à respecter lors de l'envoi des données, ce protocole de communication permet de connecter n'importe quel système d'*eye tracking* à partir du moment où les données sont accessibles. Généralement les systèmes d'*eye tracking* fixes (systèmes déportés, souvent fixés à un ou plusieurs écrans) permettent de récupérer facilement ces données grâce à un kit de développement logiciel SDK (Software Development Kit). Les systèmes portés (wearable) ou mobiles peuvent poser des problèmes dans la récupération de ces données, notamment parce qu'ils empêchent parfois la récupération de ces dernières ou quand ces données sont fournies dans un format propriétaire¹ ou avec un délai de latence rédhibitoire à une utilisation en temps réel. Des précisions seront amenées dans la partie méthodologie

¹ Format propriétaire : « un format propriétaire, ou format fermé, est un format de données dont les spécifications ne sont pas publiques, ou dont l'utilisation est restreinte par son propriétaire ». Wikipédia (2017) repérée à https://fr.wikipedia.org/wiki/Format_propriétaire.

(cf. 3.3) sur cette relation entre les types d'*eye trackers* et les particularités des données oculaires qu'ils fournissent.

Une fois les données oculaires réceptionnées et contrôlées, le logiciel PiGaT va donner du sens à ces données brutes (temps, coordonnées en X, coordonnées en Y). En effet, les coordonnées contenues dans ces données sont analysées comme étant l'emplacement du regard de la personne équipée de l'*eye tracker*. Ainsi la première étape est de savoir à quel endroit, *i.e.* quelle zone d'intérêt (AOI), regarde cette personne. Une fois la zone d'intérêt regardée identifiée, le comportement enregistré de la personne peut être actualisé par différentes mesures. Ces mesures, détaillées dans les paragraphes suivants, correspondent à des caractéristiques du comportement oculaire actuel (ce qui est fait) et passé (ce qui a été fait depuis le début de l'expérimentation) du participant.

b) Les quatre types de variables prises en compte pour l'analyse du comportement oculaire du PiGaT

Dans cette première version du PiGaT, nous avons sélectionné 4 types de mesures qui prennent la forme de variables en programmation. Nous avons en partie basé nos choix de variables sur la facilité technique à les mettre en place **en temps réel**. Les variables choisies permettent un premier niveau d'analyse du comportement oculaire, suffisant pour nos premiers besoins, qui gagnera en complexité au fur et à mesure des évolutions du système. Ces différentes variables sont énumérées et détaillées ci-après.

- **GD_{Z(i)}** : la durée du regard dans une AOI en ms (Gaze Duration)
- **DwT_{Z(i)}** : le temps total passé à regarder dans une AOI en ms (Dwell Time)
- **PDwT_{Z(i)}** : la proportion du temps total passé à regarder dans une AOI en % (Proportional Dwell Time)
- **Time** : la durée depuis le début de la session (ms)

GD_{Z(i)}: la durée du regard dans une AOI est une variable en millisecondes (ms). Elle est calculée en continu pour toutes les AOI définies et permet d'analyser le

comportement courant de l'opérateur. De manière assez binaire, soit une AOI est regardée, soit elle ne l'est pas. C'est pourquoi, pour chaque AOI, il est comptabilisé depuis combien de temps elle est regardée ou depuis combien de temps elle n'est plus regardée. Le temps d'une AOI regardée est donné par une valeur positive qui s'incrémente tant que le regard reste à l'intérieur. Dès lors que cette AOI n'est plus regardée, le compteur retombe à 0. En parallèle, pour chacune des AOI non regardées, le temps est donné en valeur négative qui décroît tant que le regard ne revient pas dans l'AOI considérée. Dans ce cas, la durée du regard dans cette AOI repasse à 0 avant d'être incrémentée comme décrit précédemment.

DwT_{Z(i)} : le temps total passé à regarder indépendamment dans chaque AOI (ms) est également une variable calculée en continu. Elle permet d'analyser le comportement oculaire sur toute la durée de l'expérimentation. Elle correspond au temps cumulé dans chaque AOI. Pour une AOI en particulier, cette variable s'incrémente uniquement lorsque la durée du regard **GD_{Z(i)}** est en positif pour cette même AOI.

PDwT_{Z(i)} : La proportion du temps total passé à regarder dans une AOI est calculée en pourcentage. Pour une AOI, c'est la proportion de son temps total passé à être regardée (**DwT_{Zi}**) par rapport à la somme des **DwT_{Zi}** de toutes les AOI. Le calcul de cette variable est donné par la formule :

$$PDwT_{Z1} = 100 * \left(\frac{DwTZ1}{\sum_{i=1}^3 (DwTZi)} \right)$$

Time : La dernière variable correspond simplement au calcul du temps écoulé depuis le début de la session de l'expérimentation

Ces variables sont mises à jour à chaque réception de données oculaires, ce qui permet de savoir en permanence ce que la personne regarde et ce qu'elle a regardé depuis le début de l'enregistrement. Elles constituent ainsi pour le PiGaT, les capacités d'analyse du comportement oculaire. Cette analyse va ainsi permettre la détection de comportements oculaires particuliers et la production de notifications si nécessaire.

c) Production de feedbacks, de notifications

Le PiGaT offre la possibilité de choisir le feedback à fournir en réponse à l'identification de certains comportements. En effet, plusieurs types de notifications visuelles et/ou sonores ont été implémentés dans cette première version. Cette partie détaille, dans un premier temps, les notifications sonores, puis leurs homologues visuelles.

i. Notifications sonores

Concernant les notifications sonores, il est possible de produire des sons en exécutant un fichier audio, en jouant une note d'un instrument choisi parmi les instruments proposés par l'University of Calgary dans leur bibliothèque MIDI² (*Musical Instrument Digital Interface*), ou encore en synthétisant vocalement un message texte (figure 11).



Figure 11 – Les types de feedbacks audios implémentés dans la première version du PilotGazeTrainer : lecture de fichiers audios, synthèse vocale de messages texte et jeu de notes d'instruments MIDI.

ii. Notifications visuelles

Pour les notifications visuelles, le principe est d'afficher sur l'écran, en surimpression, des sortes de masques colorés de différentes manières. Concrètement ces masques sont des fenêtres Windows© générées automatiquement par PiGaT aux dimensions d'une AOI définie préalablement. Ces fenêtres n'ont pas de signes distinctifs Windows, seule leur couleur de fond est affichée selon le besoin. Elles apparaissent au premier plan de l'écran sans pour autant devenir la fenêtre active (ce qui signifie par exemple qu'une personne en train d'écrire sur un document texte pourra continuer d'écrire sur ce document

² Bibliothèque accessible à l'adresse : <http://grouplab.cpsc.ucalgary.ca/cookbook/index.php/Main/HomePage>

même après l'apparition de notifications du PiGaT). Dans la version actuelle du PiGaT, il est possible d'afficher une notification de manière statique (coloration de la zone ou du contour uniquement, dans une couleur et opacité choisies) ou de manière dynamique (remplissage ou opacification progressifs, clignotement d'une zone ou de son contour). La figure 12 illustre différentes notifications visuelles produite par le PiGaT sur l'écran d'un *glass cockpit*.

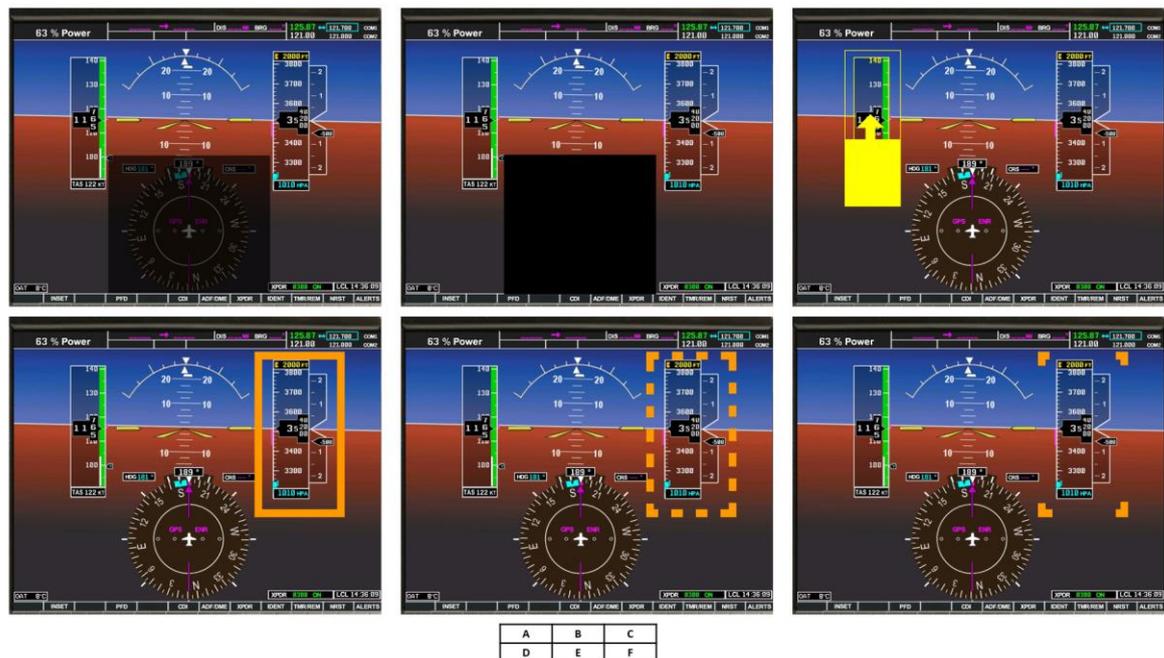


Figure 12 – Illustration des différentes notifications visuelles qui peuvent être produites par le PiGaT. L'image (A) montre l'affichage d'une zone noire transparente (cela peut également être le fruit d'une opacification progressive de cette zone). L'image (B) montre une zone noire complètement opaque. L'image (C) montre une zone en train de se remplir d'un voile jaune opaque. La progression du remplissage est symbolisée par l'ajout de la flèche jaune. Les images (D,E,F) illustres les notifications de type « bordure » pouvant être affichées de manière statique ou dynamique (clignotements).

En résumé, la définition des zones d'intérêt est une étape primordiale de l'utilisation du PiGaT puisque ces zones permettent l'analyse du comportement oculaire ET l'affichage des notifications. Ces zones d'intérêt sont définies lors de la création des scénarios d'apprentissage tout comme les règles comportementales qui permettent d'associer l'identification de certains comportements oculaires à la production de feedback dans les limites des capacités du PiGaT.

2.2.3.4 Création des scénarios d'apprentissage

La création des scénarios d'apprentissage correspond à la phase de conception de l'environnement d'apprentissage que va rencontrer l'apprenant au travers du PiGaT. Cette création se fait en deux étapes principales. La première étape permet de définir les différentes AOI statiques dans l'environnement d'apprentissage (cf. Figure 14). La seconde étape permet d'associer un ou des comportement(s) oculaire(s) (*i.e.*, comportements déclencheurs) avec une (ou des) réaction(s) du logiciel (*i.e.*, notifications/feedback). Le tout forme ce que l'on nomme une règle comportementale.

a) Définition des Zones d'intérêt et/ou de notification

La définition des AOI est permise par le PiGaT grâce à une interface sur laquelle ces AOI peuvent être dessinées en manipulation directe à l'aide de la souris. Ainsi une fenêtre à moitié transparente s'affiche sur les différents écrans et avec la souris il est possible de tracer, redimensionner et déplacer les AOI (cf. Figure 13). En enfonçant le bouton gauche de la souris, il est possible de sélectionner une zone afin de définir une AOI. Durant le processus de création de cette AOI, la zone concernée est dessinée en jaune transparent jusqu'au relâchement du bouton de la souris. Cette dernière action permet de valider la première étape de création, ce qui est symbolisé par le changement de couleur de cette zone (rouge transparent) et l'apparition des contours noirs permettant sa manipulation (*e.g.* redimensionnement).



Figure 13 – Captures d'écran illustrant la manière de définir des zones d'intérêt sur le PilotGazeTrainer. La définition des zones d'intérêt se fait en manipulation directe au travers de l'interface de PiGaT affichée en surimpression des programmes présents à l'écran. La capture d'écran de gauche montre une AOI en train d'être créée, et l'image de droite montre l'AOI créée qui peut être déplacée ou redimensionnée au besoin.

Cette interface a été conçue de sorte à pouvoir être affichée au premier plan d'un écran d'ordinateur, mais de manière transparente. Dans le cas d'une utilisation du PiGaT pour éduquer le comportement oculaire durant la pratique d'un jeu vidéo par exemple, cela permet (i) d'exécuter le jeu vidéo et (ii) de définir précisément les AOI souhaitées directement en situation, grâce à la transparence de l'interface de création des AOI (figure 13).

Ainsi il est facile pour n'importe quel utilisateur de structurer l'environnement d'apprentissage avec plusieurs AOI qui serviront à l'analyse du comportement oculaire et/ou à l'affichage de notifications. La figure 14 montre un exemple d'environnement structuré avec quatre AOI. Nous nous servons de cet exemple comme d'un fil rouge pour l'explication des règles comportementales décrites dans les paragraphes suivants.

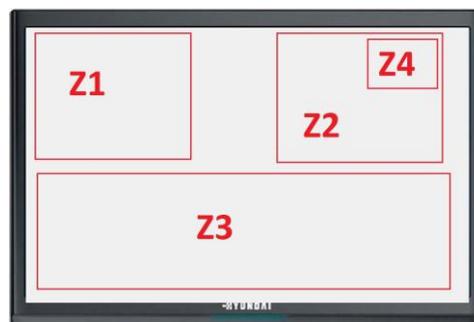


Figure 14. Exemple de définition de zones d'intérêt.

b) Définition des règles comportementales

Les règles comportementales permettent d'associer un (ou des) comportement(s) déclencheur(s) à une (ou plusieurs) notification(s). Les comportements déclencheurs sont des comportements oculaires à détecter de manière automatique par le logiciel et les notifications sont les réactions que le système doit avoir en cas de détection de ces comportements.

Le principe de ces règles comportementales pourrait être comparé à la structure de contrôle <SI>/<ALORS> en algorithmie.

<SI> un comportement déclencheur est détecté, <ALORS> le logiciel produit les notifications associées.

La création de ces règles est la seconde étape dans la conception des scénarios d'apprentissage. Après la définition des AOI, le PiGaT propose de gérer cette création de règle le plus simplement possible par d'une interface utilisateur. Afin de ne pas alourdir cette section, le détail de la description de cette interface utilisateur est présenté en annexes (annexe 1). Cette interface permet de guider le créateur du scénario dans la définition des différents composants de la règle : (a) définir le comportement à détecter à l'aide de conditions de déclenchement, (b) définir les actions à réaliser (les notifications à produire).

La **définition du comportement déclencheur d'une règle** se fait à l'aide de conditions qui correspondent à la partie <SI> de la structure de la règle comportementale. L'interface permet aisément d'ajouter, modifier ou supprimer des conditions. Ainsi un comportement à détecter peut être défini par plusieurs conditions. Plus il y a de conditions et plus le comportement à détecter est complexe. Cela permet ainsi de s'intéresser à de nombreux comportements différents. Lors de l'ajout ou de la modification d'une condition, le PiGaT propose de choisir parmi les 4 variables définies précédemment et de leur apposer une valeur-seuil, ce qui permettra la détection automatique. Il est par exemple possible d'associer la durée du regard dans la zone 1 [*i.e.*, GD_{z1}] et la valeur-seuil de 2000 millisecondes (figure 15). Cela signifie que dès lors qu'une personne regardera cette zone plus de 2 secondes, le logiciel saura l'identifier et sera en mesure de déclencher les notifications associées. A ce stade, la règle se présente sous la forme :

SI ($GD_{z1} > 2000ms$) ALORS {action(s)}.

Le **choix des actions ou notifications à réaliser** lors de la détection du comportement défini est facilité par le PiGaT. Il est également possible de définir une ou plusieurs notification(s) par règle comportementale. Lors de l'ajout d'une

notification à produire, l'interface du PiGaT propose de choisir parmi tous les types de notifications possibles cités précédemment. Une fois la notification sélectionnée, certains champs sont à remplir (*e.g.* la couleur à afficher, la fréquence d'un clignotement ou la note à jouer ainsi que l'instrument choisi). Pour compléter l'exemple précédent, nous pourrions choisir de faire clignoter la zone 3 en jaune, ce qui donnerait :

SI ($GD_{z1} > 2000ms$) ALORS {Zone3 clignote en jaune}.

La figure 15 montre un scénario d'apprentissage configuré avec 2 règles comportementales. Cela illustre le fait qu'il est possible de créer plusieurs règles dans un même scénario, et qu'on peut associer une ou plusieurs conditions de déclenchement (*i.e.* comportement déclencheur) à une ou plusieurs notifications (*i.e.* feedbacks).

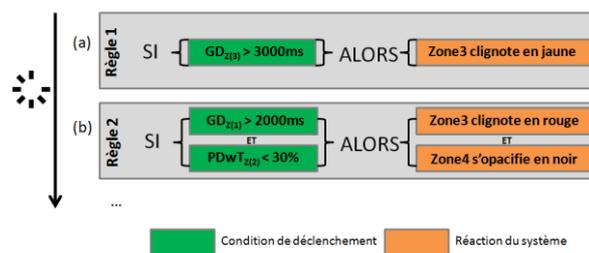


Figure 15. Fonctionnalité et traitement séquentiel d'un scénario d'apprentissage du PiGaT comprenant 2 règles comportementales. La première règle (a) consiste à faire clignoter la zone 3 en jaune à chaque fois que la durée du regard dans la zone 3 est supérieure à 3000ms. La seconde règle (b) fait clignoter la zone 3 en rouge ET cache progressivement la zone 4 en noir (l'opacifie) lorsque la durée du regard dans la zone 1 dépasse les 2000ms ET que la proportion du temps passé à regarder la zone 2 est inférieure à 30%

De cette manière, le créateur du scénario jouit d'une grande liberté en utilisant des comportements déclencheurs et/ou notifications plus ou moins complexes. Cette liberté de création permet d'imaginer l'utilisation du PiGaT dans des situations qui dépassent le seul cadre du pilotage (*e.g.* conduite automobile, contrôle aérien, jeux vidéo, etc.)

2.2.3.5 Limites et perspectives du PilotGazeTrainer

Au moment de la rédaction de ce manuscrit, le PiGaT est dans sa première version fonctionnelle *V1*. En tant que première version, le niveau de complexité a été limité afin d'assurer un fonctionnement sans erreur. PiGaT sera amené à évoluer et à se complexifier en suivant un cycle de conception itératif et centré utilisateur.

Actuellement, le PiGaT est limité par certaines de ses caractéristiques. La première limite, la plus importante, est le choix des variables pour l'analyse du comportement. En effet, ces variables permettent un premier niveau d'analyse intéressant mais sont dépendantes des zones d'intérêt définies dans le scénario d'apprentissage concerné. Cela contraint les utilisations du PiGaT aux environnements où des zones d'intérêt fixes peuvent ainsi être définies. De plus, le nombre de mesures est relativement limité ce qui réduit les possibilités de détection de comportements oculaires.

Une deuxième limite se trouve dans le choix des notifications visuelles. Les possibilités d'affichage de notifications sur la base des zones d'intérêt pourraient paraître suffisantes, mais ici encore cela nécessite la définition de zones d'intérêt.

Enfin, le PiGaT a été développé dans le langage de programmation C# qui est destiné principalement aux environnements Windows®. L'utilisation du PiGaT n'est donc actuellement pas destinée à d'autres systèmes d'exploitation.

Excepté le choix de l'environnement Windows®, les limitations du PiGaT ont vocation à disparaître dans les prochaines itérations. En effet, nous avons comme ambition de faire évoluer ce logiciel en implémentant un composant dédié à l'analyse des fixations oculaires. Ainsi, un certain nombre de mesures supplémentaires du comportement oculaire pourraient être proposées pour la définition des comportements déclencheurs (*i.e.* nombre de fixations, fréquence de fixation, durée moyenne des fixations, distance moyenne entre les fixations). Ces mesures peuvent être calculées dans les différentes AOI mais également de manière générale, cela permettrait ainsi de s'affranchir, pour certaines mesures, de la définition d'AOI statiques.

Une autre amélioration envisagée concerne l'analyse du comportement passé des personnes. Actuellement, nous proposons uniquement une analyse depuis le début de l'enregistrement. Nous pensons cependant qu'il serait judicieux de proposer la possibilité d'analyser le comportement passé sur une durée définie dans le scénario d'apprentissage. Cela permettrait de concevoir des comportements déclencheurs d'une plus grande finesse comme par exemple : **SI** dans les 20 dernières secondes le temps total de regard dans la Zone2 est supérieur à 4000ms **ALORS** {Action(s)}. Nous avons aussi réfléchi à certains feedbacks ou notifications pour compléter les choix actuels. Afin de s'affranchir en partie des zones d'intérêt, nous souhaitons pouvoir afficher des notifications à une distance relative à la position du regard. Cela pourrait prendre la forme de l'affichage de la position du regard avec un cercle plus ou moins grand (coloré entièrement ou uniquement son contour).

Enfin, nous avons pensé à intégrer la possibilité d'utiliser des zones d'intérêt dynamique pouvant se déplacer dans l'environnement (*i.e.* un avion conflictuel dans un secteur de contrôle aérien ; Imbert, 2014). Cette amélioration devrait s'intégrer relativement facilement grâce au bus IVY. En effet, il serait possible d'actualiser la position de certaines zones en envoyant les nouvelles coordonnées ce qui permettrait au PiGaT de continuer à analyser correctement le comportement oculaire ou de fournir une notification à cet emplacement.

Le logiciel du PilotGazeTrainer permet donc de mettre en application la méthode d'éducation proposée qui analyse d'une nouvelle manière (*i.e.* paradigme) le comportement oculaire d'une personne. Dans cette première version, un certain nombre de possibilités sont offertes pour concevoir des scénarios d'apprentissage et d'autres sont prévues dans les itérations futures de ce logiciel. En l'état actuel, il est possible de l'utiliser afin d'évaluer expérimentalement les effets de cette nouvelle méthode d'éducation du comportement oculaire. Dans le but de préparer au mieux cette démarche expérimentale, nous avons eu une première réflexion sur les bénéfices attendus de cette méthode d'éducation. Les paragraphes suivants dressent une synthèse de cette réflexion.

2.3 Etape 3 : L'évaluation des bénéfices de notre méthode d'éducation du comportement oculaire

A ce stade, la nouvelle méthode d'éducation du comportement oculaire proposée n'avait jamais été testée. Par conséquent il n'était pas possible de décrire ce que cette dernière apportait réellement comme bénéfices. Cependant nous faisons l'hypothèse que les élèves dont le comportement oculaire serait éduqué de cette manière devraient : (1) améliorer la performance à la tâche concernée, (2) développer des connaissances généralisables sur le comportement oculaire à avoir ainsi que (3) la conscience de leur propre comportement oculaire, ce qui aurait pour conséquence (4) d'améliorer leur faculté d'adaptation.

2.3.1 Amélioration de la performance

Dans la majorité des études portant sur les méthodes d'éducation du comportement oculaire (cf. 1.2.1), cette éducation avait un effet sur la performance. En effet, les personnes dont le comportement oculaire avait été éduqué, montraient rapidement une meilleure performance à la tâche concernée que des personnes n'en ayant pas bénéficié (Vine *et al.*, 2012 ; Sadasivan *et al.*, 2005 ; Becic *et al.*, 2008 ; Shapiro & Raymond, 1989). Dans le cas de notre méthode, nous faisons l'hypothèse qu'un des bénéfices apportés par la méthode d'éducation que nous proposons, est également une amélioration de la performance à la tâche concernée.

2.3.2 Développement de connaissances généralisables

Notre deuxième hypothèse concerne, dans notre méthode, l'apprentissage des règles comportementales. Contrairement aux méthodes d'éducation existantes qui permettent l'enseignement d'un comportement oculaire à suivre dans un contexte très spécifique, *i.e.* un circuit visuel, notre méthode permet l'apprentissage de règles comportementales qui sont des connaissances généralisables. Par définition, les connaissances générales sont des connaissances applicables à une variété de

situations (Cauzinille-Marmeche, & Mathieu, 1994). Par exemple, éduquer une personne à répartir correctement son attention visuelle entre le cockpit et la surveillance du ciel, devrait être une connaissance utile pour toutes les situations et manœuvres en vols à vue. Nous faisons ainsi l'hypothèse que l'apprentissage de ces règles comportementales favorisera une meilleure adaptation à de nouvelles situations.

2.3.3 Développement de la conscience de son propre comportement oculaire

Les feedbacks fournis par notre méthode d'éducation du comportement oculaire peuvent être considérés comme des bio-feedbacks. Par définition, ils permettent d'associer des ressentis corporels fins à l'information contenue dans le feedback (« mauvais comportement »). Nous faisons l'hypothèse que cela permettra à l'apprenant de développer la conscience qu'il a de son propre comportement oculaire et des erreurs qu'il commet.

2.3.4 Amélioration de la faculté d'adaptation

Nous avons évoqué plusieurs fois le fait que cette nouvelle méthode permettrait de mieux s'adapter à une situation nouvelle. C'est un élément clé de cette méthode qui a été consciemment recherché. Le pilotage est une activité complexe et notamment, un vol entier comprend plusieurs phases (*i.e.* décollage, montée, croisière, descente, approche, atterrissage) nécessitant, pour chacune d'entre elles, des actions spécifiques et une surveillance des paramètres de l'avion différente (Schvaneveldt *et al.*, 2000). Les connaissances actuelles ne permettent pas de présenter un comportement oculaire de référence à adopter dans chacune de ces parties du vol. De plus, ces phases de vols ne sont jamais identiques d'un pilote à un autre et d'un vol à un autre. Nous nous sommes donc concentrés sur un apprentissage généralisable afin que les élèves soient en mesure de mieux s'adapter à toutes les situations qu'ils rencontreront. Cette ambition est en cohérence avec les objectifs de

la formation de pilotage de l'Armée de l'air. La faculté à s'adapter à n'importe quelle situation ou n'importe quel cas de figure (*e.g.* panne, situation de combat, etc.), accompagnée ou non d'une forte charge cognitive, est une compétence recherchée pour les pilotes militaires.

Cette réflexion a fait écho à un courant récent du domaine de l'expertise appelé expertise adaptative ou *adaptive expertise* en anglais (Hanato & Inagaki, 1986). Dans cette littérature, nous avons notamment trouvé une méthodologie permettant d'évaluer cette capacité d'adaptation. Cette méthodologie permet d'évaluer l'influence d'une première période d'apprentissage (*i.e.* l'éducation du comportement oculaire dans notre cas), sur l'évolution des performances sur une seconde tâche lors d'une seconde période d'apprentissage. Cette réflexion est cependant arrivée tardivement dans ces travaux de thèse. Nous avons fait le choix de ne pas inclure ce concept dans le contexte théorique mais de le décrire brièvement dans le chapitre expérimental concerné. Des précisions sur cette autre théorie de l'expertise (Holyoak, 1991) seront apportées dans le chapitre 5 en préambule de l'expérimentation visant à évaluer expérimentalement les bénéfices amenés par cette nouvelle méthode originale d'éducation du comportement oculaire.

Rappel & Synthèse de la problématique de thèse

Dans le cadre de l'optimisation de la formation de pilotage de l'Armée de l'air, nous avons étudié la possibilité d'améliorer les méthodes d'éducation du comportement oculaire. L'analyse de la littérature portant sur ce genre de méthode, nous a permis d'identifier une absence de méthode existante compatible avec la situation de pilotage, ce qui nous a contraint à en concevoir une nouvelle. Cette nouvelle méthode s'appuie en très grande partie sur les possibilités de l'outil développé ad hoc : le PilotGazeTrainer (PiGaT). La première partie (*i.e.* Contexte théorique) a ainsi permis de décrire la démarche de visant à éduquer le comportement oculaire des élèves-pilotes ainsi que les caractéristiques du PiGaT. La suite de ce manuscrit est consacrée à l'évaluation de cette nouvelle méthode d'éducation du comportement oculaire. Elle est constituée des trois parties restantes, à savoir, les principaux éléments méthodologiques de la thèse (Partie II), les deux campagnes

d'expérimentation principales (Partie III) et les conclusions et perspectives (Partie IV).

Dans la partie méthodologie (Partie II) nous présentons, dans un premier temps (Chapitre 3), les deux dispositifs expérimentaux sur lesquels nous avons réalisé les expérimentations, à savoir, un simulateur et un *micromonde* de pilotage (simulateur simplifié censé répliquer l'activité visuelle du pilotage). Le concept de micromonde est défini plus précisément dans le chapitre qui suit. Nous avons fait ce choix méthodologique fort car les études en simulateur nous contraignaient à ne faire participer que des personnes ayant des connaissances en pilotage. De plus les pilotes ou élèves-pilotes sont des ressources rares qu'il ne faut pas exposer à des expérimentations susceptibles de modifier de manière durable leur comportement sans avoir vérifié, au préalable, l'absence de conséquences néfastes à l'activité quotidienne de ces derniers. C'est une des raisons pour lesquelles nous nous sommes également tournés vers l'outil le plus adapté à ce genre de problème : le *micromonde* (Brehmer & Dörner, 1993). Ce choix d'utiliser un micromonde n'a pas été sans conséquences car il existe relativement peu de micromondes et ces derniers sont très spécifiques. Dans le domaine aéronautique, aucun micromonde ne s'est révélé adapté à nos besoins. Nous avons donc dû, ici encore, concevoir et développer notre propre micromonde appelé *AbstractFlyingTask* ou AFT. Ce chapitre détaille donc ces deux environnements (simulateur et micromonde) puis présente les dispositifs d'*eye tracking* utilisés et leurs particularités respectives.

Le deuxième chapitre de cette partie (Partie II – Chapitre 4) présente deux expérimentations qui nous ont permis de valider expérimentalement (1) la viabilité technique du PiGaT, (2) le fonctionnement de notre méthode d'éducation du comportement oculaire en situation dynamique et complexe, et enfin (3) la validité écologique (cf. 3.2.2) du micromonde AFT. Comme expliqué en introduction de ce manuscrit, nous avons séparé consciemment ces deux expérimentations de la partie expérimentales (Partie III). Nous avons souhaité améliorer la lisibilité de ce manuscrit en incluant dans la partie méthodologie, les expérimentations dont les

questionnements portaient sur l'évaluation de l'utilisation des outils informatiques (domaine des Interactions Homme-Machine). En effet, ces expérimentations font office de vérifications préalables qu'il était nécessaire de réaliser avant d'utiliser ces mêmes outils dans le cadre d'expérimentations visant à évaluer le comportement humain (domaine des Facteurs Humains, Partie III).

Concernant la troisième partie (Partie III), nous présenterons les deux expérimentations principales de cette thèse. La première (Chapitre 5) a été réalisée sur micromonde et avait pour but d'évaluer les bénéfices de notre méthode d'éducation du comportement oculaire, notamment en termes de faculté d'adaptation et d'amélioration de la performance. La seconde expérimentation (Chapitre 6), réalisée sur le simulateur de vol, a permis d'analyser le comportement oculaire ainsi que la performance des pilotes de l'armée de l'air française à différents degrés d'expertise. Faire cet état des lieux était essentiel afin d'obtenir les mesures nécessaires à l'élaboration de scénarios d'apprentissage qui permettront une application concrète de notre méthode d'éducation du comportement oculaire à la formation de pilotage de l'Armée de l'air française.

Enfin, la quatrième partie (Partie IV) clôture ce manuscrit par une discussion des résultats avant de conclure sur les contributions et les perspectives de ces travaux de recherche.

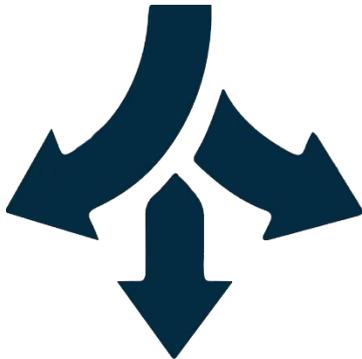
Nota Bene :

Il y a donc eu 2 développements importants dans cette thèse : (1) le PiGaT qui constitue le cœur de notre méthode d'éducation, et (2) le micromonde AFT qui est un environnement de test permettant d'étudier des participants non pilotes en laboratoire. Ces deux outils informatiques ont été conçus et développés avec l'ambition d'en faire des outils réutilisables dans le contexte de la recherche et potentiellement dans la formation des pilotes de l'Armée de l'air. Il fallait donc concevoir ces « outils » en prévoyant de potentielles évolutions futures et en

réfléchissant aux diverses utilisations possibles. Ces outils ont également vocation à être valorisés et utilisés en dehors du contexte de l'Armée de l'air. Différentes formes de protection et de redistribution ont été envisagées (*e.g.* brevet, licence libre, *open source*, etc.) sans pour autant arrêter une direction en l'état actuel de ces outils. Pour ces raisons, nous avons mis en place les principes fondamentaux des méthodes de conception participatives et centrées utilisateurs (norme ISO 9241-210:2010). Le processus de développement a été réalisé en quatre phases itératives : analyse, conception, prototypage, validation. D'abord les utilisateurs principaux ont été identifiés comme étant les expérimentateurs, chercheurs en facteurs humains ou psychologie expérimentale ainsi que les instructeurs-pilotes. Ces utilisateurs n'ont pas toujours de compétences fortes en informatique et programmation. De ce fait, nous avons souhaité réaliser un outil utilisable aisément par tous. C'est pourquoi nous avons conçu des prototypes papier puis interactifs que nous avons fait tester à chaque étape par des utilisateurs finaux identifiés (*i.e.* utilisation de la technique de test utilisateurs appelée « Wizard of Oz », Kelley, 1984). Puis, une fois les choix de fonctionnalités et les modalités d'interactions validés, le travail de développement informatique a débuté. Cette démarche de conception a représenté un coût important, mais cela a néanmoins permis d'obtenir des outils informatiques conçus pour évoluer et pour se complexifier tout en assurant leur accessibilité à des personnes novices en informatique.

Partie II
Méthodologie, Développement &
Validation

Chapitre 3



Présentation des environnements expérimentaux et des dispositifs d'*eye tracking*

Ce chapitre détaille les deux environnements expérimentaux que nous avons utilisés dans cette thèse ainsi que les dispositifs d'*eye tracking*. La première partie sera consacrée au simulateur de vol. La deuxième partie expliquera plus précisément ce que signifie le terme « micromonde » et détaillera le micromonde AbstractFlyingTask que nous avons développé. Ce chapitre sera clôturé par la description des deux *eye tracker* utilisés ainsi que par le scénario d'apprentissage conçu avec le PiGaT pour la réalisation des premiers tests.

3.1 Présentation du simulateur de Cirrus© SR20

Le premier environnement expérimental que nous avons façonné était un simulateur de l'avion en dotation à Salon-de-Provence pour la phase de formation initiale au pilotage de l'armée de l'air : le Cirrus SR20 (figure 16).



Figure 16 - Photographie du Cirrus SR20 devant la tour de contrôle de la BA701 à Salon-de-Provence

Le matériel de simulation était composé de deux ordinateurs (PC). Le premier avait comme fonction l'affichage de l'environnement extérieur sur trois écrans de 23 pouces chacun (SYNMASTER MD230, 60Hz, 1920x1080). Cet environnement extérieur était rendu par le logiciel de simulation de vol Xplane 10.r36. Le second ordinateur simulait le *glass cockpit* du Cirrus SR20 sur deux écrans tactiles (IIYAMA PLT2250MTS, 60Hz, 1920x1080). Le *glass cockpit* (Garmin 1000) était une émulation permise par le logiciel SIMAVIO de l'entreprise FlyThisSim. L'interaction avec Xplane était réalisée à l'aide des périphériques Logitech G940 comprenant le joystick, la manette des gaz et le palonnier. La figure 17 illustre l'ensemble de ce dispositif.



Figure 17 - Photographies du simulateur du Cirrus SR20 en cours de conception, sous la supervision d'instructeurs de l'Armée de l'air.

Afin que ce simulateur soit le plus proche possible de l'environnement réel que rencontrent les élèves au début de leur formation, nous avons fait intervenir des spécialistes de l'Armée de l'air pour configurer, tester et valider ce dernier (*i.e.* instructeurs-simulation et instructeurs-pilotes de l'escadron de formation en vol). Ce simulateur peut être qualifié de haute-fidélité par rapport à la situation de pilotage sans pour autant constituer la reproduction parfaite de cette situation comme pourrait le faire un simulateur « full flight » (Robinson, Mania, & Perey, 2004).

La partie suivante décrit le second environnement d'expérimentation que nous avons confectionné. Contrairement au simulateur qui reste relativement classique, ce deuxième environnement est plus singulier. Nous avons, en effet, dû concevoir et développer un nouveau micromonde (tâche de laboratoire complexe) afin de pouvoir réaliser des expérimentations plus contrôlées avec des participants non pilotes tout en restant dans un contexte cohérent avec la situation de pilotage. Ce micromonde a pris le nom de `AbstractFlyingTask`.

3.2 Présentation du micromonde `AbstractFlyingTask` (AFT)

Le micromonde AFT constitue une des contributions de cette thèse. C'est un outil conçu pour supporter la démarche d'évaluation du `PilotGazeTrainer`, mais son potentiel dépasse ce simple cadre. Pour détailler toutes les caractéristiques de l'AFT, cette partie sera découpée en deux sous-sections. La première explicitera ce que nous désignons exactement par le terme *micromonde*, puis nous détaillerons les avantages et les utilisations de ce genre d'environnement. Cette première sous-section se terminera par la présentation des micromondes existants dans le domaine de l'aéronautique qui ne pouvaient pas convenir à nos besoins.

La seconde sous-section sera dédiée à la conception et au développement de notre propre micromonde : l'`AbstractFlyingTask`.

3.2.1 Définition des micromondes

« Micromonde » est le nom donné à un certain type de simulation. Historiquement ce nom a été donné par Turkle en 1984 pour parler des premières simulations complexes permettant un fort contrôle expérimental, utilisées en laboratoire, notamment pour l'étude des prises de décisions. Ces micromondes sont le résultat de l'introduction des ordinateurs dans les laboratoires de psychologie. Cela libéra les psychologues des limitations de la technologie papier-crayon qui était traditionnellement utilisée dans ce type d'études (Brehmer, 2005). Les utilisations de ce type d'outil se sont multipliées tout comme les expressions pour les définir. Il est dès lors fréquent de trouver des termes tels que 'microworlds', 'synthetic task environment', 'low fidelity simulations', 'interactive learning environnements', 'virtual environment' et 'scaled world'. Mais, tout comme d'autres avant nous (Gonzalez, Vanyukov et Martin, 2005), nous utiliserons dans ce manuscrit exclusivement le terme de « micromonde ».

Afin de commencer à cerner les caractéristiques intrinsèques des micromondes, nous les avons replacés dans la typologie des simulations proposée par Eyrolle *et al.* en 1996, elle-même basée sur les caractéristiques des simulations énoncées par Baker & Mashall (1989). Ainsi les simulations peuvent être caractérisées par leur dynamique, les possibilités d'interaction et la fidélité physique par rapport à la situation de référence. Dans cette typologie, les simulations sont réparties en deux premières catégories : (1) les simulations statiques ne reproduisant pas le caractère dynamique de la situation, qui présentent l'avantage de confronter tous les sujets à une situation identique (Leplat et Bisseret, 1965 ; Mariné, Cellier et Valax, 1988), et (2) les simulations dynamiques, qui reproduisent le caractère dynamique de la situation simulée.

Les simulations dynamiques peuvent à leur tour être séparées en deux catégories : passives ou interactives. Les simulations passives ne permettent pas au sujet d'interagir avec le processus dynamique (*e.g.* la simulation météorologique), tandis

que les simulations interactives permettent des interactions en temps réel du sujet avec le processus.

Enfin, les simulations interactives se subdivisent en simulations réalistes (*i.e.* fidélité forte) qui reproduisent les caractéristiques physiques de façon complète, et en simulations partielles (*i.e.* fidélité faible) qui n'en reproduisent qu'une partie.

Ainsi les micromondes sont des simulations dynamiques, interactives et partielles pour lesquelles l'habillage contextuel est secondaire (Eyrolle *et al.*, 1996). La figure 18 récapitule cette typologie et le positionnement des micromondes.

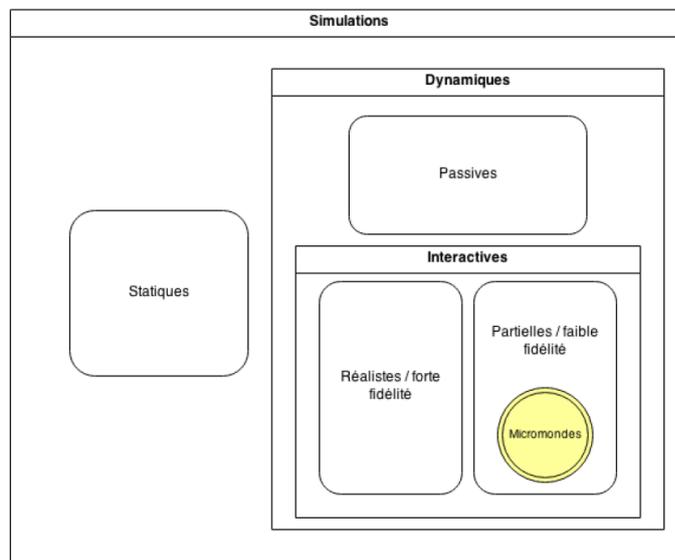


Figure 18 - Typologie des simulations (Eyrolle *et al.* 1996) ainsi que le positionnement des micromondes dans cette dernière.

3.2.1.1 Les avantages des micromondes

Dans le contexte des études de situations complexes, les micromondes sont donc des simulations particulières qui viennent se rajouter aux outils des chercheurs en proposant une alternative entre les observations en situation réelle et les études décontextualisées en laboratoire (Brehmer & Dörner, 1993). Leur positionnement stratégique place la personne observée dans un environnement plus réaliste que dans les des tâches classiques de laboratoire, tout en conservant un fort contrôle expérimental faisant défaut aux observations en situation réelle.

Dans le cas des micromondes, le réalisme ne concerne pas l'habillage contextuel, souvent appelé fidélité, mais plutôt la reproduction de la nature de la situation et des activités à réaliser. Pour parler de ce réalisme, le terme d'écologie est fréquemment utilisé. La validité écologique correspond à la correspondance entre les conditions de laboratoire et celles rencontrées en situation réelle. Par exemple, la nature dynamique et interactive des micromondes leur permet de reproduire le dynamisme et la complexité d'une situation. Cette validité écologique est un gage de proximité avec la situation réelle concernée. Certaines études semblent, par exemple, montrer que les performances dans la situation réelle peuvent être prédites par les performances obtenues sur un micromonde de cette situation (Riga, Carling et Brehmer, 2002). En effet, ce type d'environnement est supposé mobiliser des processus cognitifs similaires à ceux utilisés dans la situation cible et cela dans un contexte (*i.e.* une situation) de même nature.

Pour ce qui est du contrôle expérimental, les micromondes sont décrits comme étant malléables et opaques (Gray, 2002 ; Brehmer, Schifflett, Elliott, Salas & Coover, 2004 ; Gonzalez *et al.*, 2005). Contrairement aux observations en situation, les différents paramètres d'un micromonde sont connus et peuvent être manipulés par l'expérimentateur. Malgré cela, un micromonde est dit plus ou moins opaque par rapport à la difficulté que représente la compréhension de son fonctionnement par un participant. Les micromondes ont souvent la caractéristique de paraître aléatoires et imprédictibles pour le participant alors même qu'ils suivent un scénario bien défini et connu à l'avance par l'expérimentateur.

D'autres aspects de ces micromondes ont également été décrits en termes d'engagement et d'immersion du participant. Contrairement aux tâches de laboratoire souvent qualifiées de redondantes et parfois décourageantes à cause du besoin de répétitions et d'une non-contextualisation, les micromondes sont plus attractifs (Gray, 2002). La pression temporelle, l'interactivité et la contextualisation augmentent nettement la probabilité que les participants s'engagent dans la tâche

et il est possible de considérer, de ce point de vue-là, les comportements observés comme naturels (Dörner & Schaub, 1994 ; Gray 2002).

Les micromondes sont donc des outils de compromis permettant à la fois de travailler sur une tâche suffisamment réaliste et engageante pour que les résultats soient généralisables, mais également suffisamment simplifiés pour être utilisés avec des novices de manière très contrôlée. Cela constituait donc l'outil idéal pour cette recherche. En effet l'utilisation d'un micromonde a permis de tester notre méthode d'éducation sur des non-pilotes tout en réduisant la distance à parcourir pour généraliser ces résultats au pilotage en simulateur. La suite de ce chapitre détaille les cas fréquents d'utilisation de ces micromondes.

3.2.1.2 Utilisations des micromondes

Par leurs caractéristiques, les micromondes sont des outils pertinents dans le cadre de la recherche expérimentale, la formation ou encore la sélection d'opérateurs.

Concernant la recherche expérimentale, les micromondes sont des outils pertinents pour d'étudier à la fois des opérateurs experts et novices. En effet, le fait que le micromonde soit suffisamment proche de la situation cible (*i.e.* écologiquement valide) permet aux experts de mobiliser les connaissances et compétences acquises dans la pratique de la tâche en situation réelle. A l'inverse, la simplification de la tâche permet de former rapidement des novices et de les étudier également sur cet environnement de test.

Ce type d'environnement est également pertinent pour la formation notamment parce qu'il permet de mobiliser les mêmes processus cognitifs que la situation cible. Pratiquer un micromonde permet ainsi de développer des compétences pertinentes et facilement transférables. C'est par exemple ce qu'ont réalisé Gopher *et al.* (1994) avec le micromonde Space Fortress pour améliorer la formation des pilotes de l'armée israélienne.

Pour finir, le fait qu'il soit possible de prédire les performances dans la situation réelle à partir de celles obtenues dans un micromonde (Riga *et al.*, 2002) en fait un outil privilégié pour la sélection. En effet, cela permet d'évaluer certaines compétences dont l'utilité est connue pour la situation cible avant même de commencer la formation. C'est notamment le choix qui a été fait par l'ENAC pour le test de sélection de ses pilotes de ligne (Matton, Paubel, Cegerra et Raufaste, 2016).

3.2.1.3 Les micromondes aéronautiques

Les micromondes permettent d'étudier un nombre important de domaines tels que la lutte contre les incendies (Omodei & Wearing 1995 ; Brehmer 1992), les situations militaires de command-and-control (C2) (Vachon, Vallières, Jones, & Tremblay, 2012), l'investissement en bourse (DiFonzo & Bordia, 1997) ou encore la cyber sécurité (Rajivan, 2011). Pour permettre l'évaluation du PiGaT, nous avons étudié plus précisément les micromondes aéronautiques pour savoir si certains permettaient de simuler la partie visuelle du pilotage dont nous avons besoin. Les principaux micromondes aéronautiques identifiés sont présentés ci-après.

a) Space Fortress

Le premier micromonde aéronautique est le jeu *Space Fortress* utilisé notamment par Shapiro et Raymond (1989) comme décrit précédemment (cf. 1.2). Son but est de détruire une forteresse à l'aide d'un vaisseau spatial tirant des missiles. Celui-ci doit être dirigé afin de donner la direction des missiles et d'éviter les événements imprévisibles comme l'apparition de mines et de missiles de riposte de la forteresse. Ce micromonde permet notamment de reproduire l'aspect dynamique, complexe de la situation de pilotage ainsi que la gestion des événements imprévisibles. La figure 19 présente pour rappel, une capture d'écran de *Space Fortress*.



Figure 19 – Capture d'écran du micromonde Space Fortress.

b) NASA-MATB

Un autre micromonde fréquemment utilisé dans le domaine aéronautique se nomme NASA-MATB-II pour *Multi-Attribute Task Battery* (Comstock & Arnegard, 1992). Comme son nom l'indique, il a été conçu par la NASA et il peut se trouver facilement à l'adresse (<https://matb.larc.nasa.gov/>) et se télécharger dans une version *open source*. Le principe de ce micromonde est d'évaluer la capacité à gérer plusieurs tâches de différentes natures en même temps : monitoring de jauges, suivi de cible, communication ou encore gestion de ressources. Ces tâches ont été conçues dans le but de reproduire les activités types du pilotage. Il est d'ailleurs possible d'y voir une instantiation du modèle ANCS de Wickens (2002) concernant les types d'activités à réaliser. Ce micromonde est connu pour être très exigeant cognitivement, c'est pourquoi il est très régulièrement utilisé pour étudier la charge mentale (Santiago-Espada, Myer, Latorella, & Comstock, 2011 ; Gutzwiller, Wickens & Clegg, 2014 ; Karpinsky, Chancey & Yamani, 2016). La figure 20 montre à quoi ce ressemble ce micromonde.

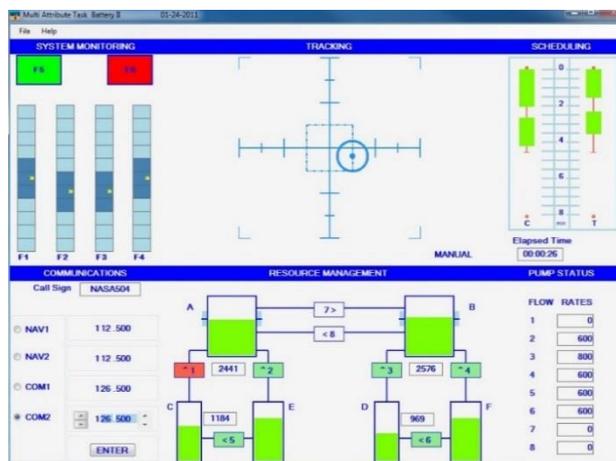


Figure 20 – Le micromonde NASA-MATB-II

c) Laby

Le dernier micromonde aéronautique que nous souhaitons présenter concerne cette fois-ci le contrôle aérien. Ce micromonde a été conçu et développé à l'ENAC (Parise, Imbert, Morais & Alonso, 2012 ; Imbert, Hodgetts, Parise, Vachon & Tremblay, 2014). La tâche principale du Laby est de diriger un ou plusieurs avions afin qu'il(s) suive(nt) un chemin défini, plus ou moins complexe. Pour cela, les participants doivent renseigner par l'interface, les valeurs de cap, d'altitude et de vitesse qu'ils veulent donner en consigne aux différents avions présents. Les avions dirigés doivent rester sur le chemin matérialisé en vert (figure 21) tout en évitant les conflits potentiels avec les autres avions du secteur. L'expérimentateur peut également gérer un certain nombre d'événements (avion conflictuel, obstacles, etc.) et de consignes que le participant recevra à certains endroits du chemin parcouru par l'avion. Ce micromonde permet de reproduire la nature dynamique et complexe de la situation de contrôle aérien tout en reproduisant de manière assez fidèle la visualisation des contrôleurs aériens opérationnels. De par la proximité de la visualisation, la nature très flexible et la richesse des scénarios pouvant être mis en œuvre, ce micromonde peut être utilisé aussi bien pour la formation des élèves contrôleurs, que pour la recherche expérimentale (*i.e.* prototypage de nouvelles interactions pour le contrôle aérien, évaluation de design d'alarmes ou de notifications, etc.). La figure 21 montre une photo de ce micromonde.



Figure 21 - Photographie du micromonde Laby (Imbert, 2014).

3.2.1.4 Nécessité de création d'un nouveau micromonde de pilotage pour étudier l'activité visuelle dans le pilotage à vue (VFR)

Dans le cas des tests que nous souhaitons réaliser pour évaluer correctement notre méthode d'éducation (*i.e.* le PilotGazeTrainer), nous avons vérifié s'il existait un micromonde permettant d'étudier le pilotage en vol à vue (« aviating », cf. 1.1.2). Cette activité se caractérise principalement par la réalisation simultanée (1) de la surveillance du ciel et (2) de la surveillance des paramètres de l'avion (figure 22).



Figure 22 - Photo du simulateur SR20, avec la visualisation extérieure pour chercher les dangers extérieurs et le cockpit pour vérifier les paramètres de vol

Lorsque le pilote surveille le ciel, il recherche visuellement des dangers extérieurs dont principalement des aéronefs. A l'inverse lors de la surveillance des éléments du cockpit, le pilote doit *monitorer* l'évolution des paramètres de l'avion qui sont constamment affichés sur les écrans du *glass cockpit*. Nous n'avons pas pu sélectionner les micromondes présentés (NASA-MATB, Space Fortress), notamment parce qu'**aucun d'entre eux ne proposait de tâche de recherche visuelle**, composante importante de l'activité de pilotage à vue. Nous avons donc décidé de développer notre propre micromonde, l'AbstractFlyingTask (AFT), afin de tester dans les meilleures conditions possibles notre méthode d'éducation.

3.2.2 L'AbstractFlyingTask (AFT)

L'AbstractFlyingTask (figure 23) est un micromonde conçu comme une sorte de jeu consistant à surveiller des jauges afin de maintenir des paramètres tout en recherchant visuellement une cible (cercle plus gros indiqué par une flèche rouge et

noire dans la figure 23) parmi des distracteurs (cercles de la même couleur que la cible, légèrement plus petits).

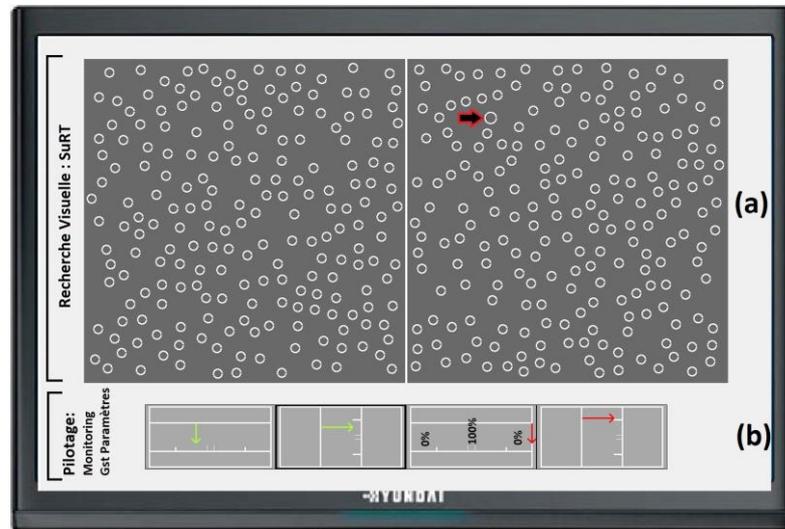


Figure 23 - Capture d'écran du Micromonde AFT annoté. Sur cette image, la cible de la tâche de *targeting* (recherche visuelle) (a) est indiquée par une flèche rouge et noire dans la partie supérieure droite de l'écran. (b) La tâche de *monitoring* (maintien de paramètres) est dans une configuration où les deux jauges de droite ont un score nul comme en témoigne la couleur rouge de leur flèche et les deux flèches de gauche sont en train de dériver vers les bords extérieurs de leur jauge respective.

Nous nommons ces tâches : tâche de *monitoring* et tâche de *targeting*. La disposition de ces tâches contribue au fait que ce micromonde soit une métaphore de l'activité de pilotage avec la tâche de *monitoring* en bas (supervision du cockpit) et la tâche de *targeting* en haut (surveillance du ciel). La figure 23 montre une capture d'écran annotée du micromonde AFT.

L'interaction avec ce micromonde se fait à l'aide d'un joystick. Le joystick doit être équipé de trois boutons sur le manche pour réaliser la tâche *targeting*. Pour la tâche de *monitoring*, il doit être équipé d'une gâchette et permettre la rotation du manche sur les 3 axes : X (Droite-Gauche), Y (Haut-Bas) et Z (rotation du poignet).

3.2.2.1 Tâche de monitoring

Cette tâche (figure 23b) symbolise l'activité de monitoring et de gestion de paramètres au sein d'un cockpit. Elle s'inspire d'une tâche du test de sélection des pilotes de ligne de l'École Nationale de l'Aviation Civile (ENAC) (Matton, Paubel, Cegarra & Raufaste, 2016). Elle se compose de quatre jauges avec une flèche

positionnée à l'intérieur de chacune d'entre elles. Au début de chaque session, toutes les flèches se trouvent au centre de leur jauge. Puis, de manière aléatoire, les flèches se mettent à dériver du centre vers une des extrémités (choisie également aléatoirement). Le but de la tâche est de réussir à garder toutes les flèches au centre de leur jauge respective. La sélection d'une flèche à déplacer se fait à l'aide des rotations du poignet (axe Z) et de la gâchette. Le repositionnement de la flèche sélectionnée se fait avec les mouvements rectilignes du manche (axes X et Y).

3.2.2.2 Tâche de targeting

Cette tâche (figure 23a) est une réplique de la Surrogate Reference Task (SuRT) (Mattes, S. 2003). SuRT est une tâche visuo-manuelle dont le but est de trouver un cercle plus large (cible) parmi d'autres cercles plus petits (distracteurs). Le participant doit répondre dans le temps imparti en appuyant sur un des trois boutons *ad hoc* placés sur le manche du joystick. Lorsque le participant donne une réponse, ou que le temps autorisé est écoulé, un feedback jaune ou rouge respectivement est affiché, et une nouvelle scène est proposée au participant. Nous avons choisi la couleur jaune pour la réponse du participant car c'est une couleur neutre qui ne donne aucune indication sur la justesse de cette réponse. SuRT convenait à nos besoins car la nature de la tâche de recherche visuelle demande aux participants de porter volontairement leur attention sur différentes zones de l'écran. Il est impossible ici de percevoir la cible de manière pré-attentive car cible et distracteurs ont la même forme et la même couleur (Bertin, 1973 ; Conversy 2015).

3.2.2.3 Deux itérations d'évaluation de l'AFT

Une des problématiques énoncées était de concevoir méthodiquement les outils informatiques. Nous nous sommes fixés cet objectif afin que ces outils puissent être utilisés et valorisés plus largement que dans le simple cadre de cette thèse. Dans cette intention, nous avons utilisé un cycle de conception itératif où des tests ont permis, à la fin de chaque itération, de valider un certain nombre de points. Pour le micromonde AFT deux itérations ont été réalisées jusqu'à présent.

Itération 1 : La validité écologique

Nous avons conçu le micromonde AFT dans le but de reproduire la nature de l'activité du pilotage (dynamique, complexe et incertaine) ainsi que celle de l'activité visuelle du pilote (recherche visuelle et supervision de paramètres). Une des expérimentations de validation des outils développés (cf. 4.2) a permis de valider la « valeur écologique » de ce micromonde par rapport à la situation réelle de pilotage. Par cette expérimentation, nous avons pu vérifier si le micromonde AFT était suffisamment complexe et engageant et si le comportement oculaire ainsi que son évolution étaient cohérents (même nature) avec le pilotage. Ces premiers résultats ont montré qu'effectivement, ce micromonde était complexe à réaliser mais que les participants s'y engageaient et progressaient avec l'entraînement (cf. 4.2.2.2, les mesures de performance). De plus, aucune incohérence avec la situation de pilotage n'a été décelée sur les mesures du comportement oculaire analysées (*i.e.* répartition du temps de fixation entre les deux tâches de l'AFT, évolution du nombre de fixations et de la durée moyenne de ces fixations). Le micromonde AFT permet ainsi d'étudier, dans une certaine mesure, l'activité visuelle du pilotage en vol à vue. La seconde itération, décrite dans les paragraphes suivants, a permis d'identifier des indices de difficultés à partir de tests de plusieurs configurations.

Itération 2 : Les indices de difficulté

Dans sa première itération, le micromonde avait été configuré nativement en reproduisant certains paramètres déjà utilisés dans la littérature (*e.g.* Benedetto, Pedrotti, Minin, Baccino, Re, & Montanari, 2011). Mais le besoin de flexibilité et d'ouverture de nouvelles possibilités est rapidement apparu notamment, pour permettre la modification du niveau de complexité et/ou de difficulté de la tâche. A l'instar de la majorité des micromondes cités précédemment (*e.g.* Laby, Space Fortress, NASA-MATB-II, etc.) nous avons rendu possible la modification de certaines propriétés. Grâce à cela, nous avons constitué plusieurs configurations que nous avons testées afin de tenter d'établir des indices de difficulté. Les paragraphes suivants détaillent dans l'ordre, (a) la configuration nativement utilisée de l'AFT,

(b) les propriétés rendues modulables et enfin (c) la démarche des tests réalisés ainsi que les trois indices de difficulté identifiés.

a) Configuration native

Dans la première version de l'AFT, nous avons utilisé, pour la tâche de *targeting*, une configuration avec 400 cercles au total (dont la cible). Cette densité représente le niveau le plus difficile de la tâche SuRT utilisée dans l'étude de Benedetto, Pedrotti, Minin, Baccino, Re et Montanari (2011). Les cercles étaient tracés avec un trait de 3 pixels d'épaisseur et avaient respectivement un diamètre de 20 et 26 pixels pour les distracteurs et la cible. Cela correspond à 35' d'arc (angle visuel) pour les distracteurs et à 44' d'arc pour la cible. Ces tailles de cercle correspondent au scénario le plus difficile de l'étude de Wynn et Richardson (2008). Nous avons également ajouté une contrainte supplémentaire, non présente dans les travaux cités, en imposant au participant un temps de réponse limité à 9 secondes. Concernant les caractéristiques de la tâche de *monitoring*, nous avons utilisé une configuration où, aléatoirement, une des quatre flèches se mettait à dériver toutes les 3,5 secondes. Cette flèche dérivait du centre vers l'extrémité de la jauge à vitesse constante (16px/s). Lorsque le participant se mettait à manipuler une flèche pour la repositionner au centre, la vitesse de déplacement (100px/s) était environ six fois plus élevée que la vitesse de la dérive des flèches.

A la suite de l'utilisation de cette configuration native, les différents paramètres de la tâche ont été identifiés et nous avons conçu une interface permettant de les modifier facilement.

b) Liste des propriétés modulables de l'AFT

Pour chacune des deux tâches qui composent l'AFT, nous avons ainsi identifié les paramètres dont la modification pouvait être pertinente. Pour la tâche de *targeting* il s'agit (i) du nombre de zones de recherche, (ii) de la densité des points par zone (les variables : nombre de cercles par zone, taille des cercles, distance minimale entre les cercles), (iii) de la différence de taille entre cibles et distracteurs, (iv) de la

nature des scènes de recherche (l'emplacement et le nombre de cibles). Pour la tâche de *monitoring* il est possible de modifier la fréquence de dérive des flèches (variable : durée entre deux départs de flèches), et le ratio entre la vitesse de dérive et la vitesse de déplacement.

c) Identification d'indices de difficulté

Pour prendre du recul sur la configuration native, et sur les possibilités offertes par l'AFT grâce aux différents aspects paramétrables, nous avons réalisé une petite expérimentation de contrôle. Nous avons ainsi souhaité évaluer si des indices de difficulté pouvaient être déterminés à partir de 8 configurations différentes du micromonde AFT dont celle utilisée nativement. Pour cela, nous avons manipulé trois paramètres : (1) le nombre de distracteurs par zone pour la tâche de *targeting*, (2) le délai de déclenchement des flèches et (3) le ratio vitesse de déplacement / vitesse de dérive pour la tâche de *monitoring*. Pour chacun de ces paramètres, nous avons choisi deux modalités sur la base de critères de difficulté objective : une modalité censée être plus simple et une autre censée être plus difficile (tableau 2). Nous les avons contrebalancées, ce qui a donné les 8 configurations différentes.

Paramètres	Modalités	Plus simple	Plus difficile
(1) nombre de distracteurs / Zone		100	200
(2) délai de déclenchement		4,5s	3,5s
(3) Ratio déplacement / dérive		X6	X2

Tableau 2 - Récapitulatif des caractéristiques des composantes du micromonde AFT testées en vue d'obtenir des indices de difficulté.

Huit étudiants de l'Ecole de l'Air ont participé à cette étude. Ils ont réalisé, dans un ordre aléatoire, 8 sessions de 2 minutes de l'AFT. Pour chaque session, le micromonde AFT était configuré différemment. A la fin de chaque session, les participants devaient évaluer l'effort mental fourni pour réaliser la tâche. Pour cela, l'échelle du *Rating Scale Mental Effort* (RSME) (Zijlstra & Van Doorn, 1985) a été utilisée. Cette échelle propose une graduation allant de 0 à 150 et comportant 9 positions différentes de « *absolutely no effort* » à « *extreme effort* ». Les résultats de

cette petite expérimentation de contrôle nous ont permis d'identifier trois indices de difficulté ressentie. Les paramètres (a) nombre de distracteurs par zone de recherche et (b) ratio vitesse déplacement /dérive ont été identifiés comme influençant davantage le ressenti de l'effort fourni. Le tableau 3 récapitule ainsi les indices de difficulté en fonction des modalités de ces deux derniers paramètres.

Paramètres	Indices de difficulté identifiés	ID1	ID2		ID3
Nombre de distracteurs / zones		100	100	200	200
Ratio déplacement / dérive		x6	x2	x6	x2

Tableau 3 - Liste des indices de difficultés (ID1, ID2, ID3) identifiés avec la description des paramètres utilisés pour configurer l'AbstractFlyingTask

La sous-partie suivante sera consacrée à la description succincte des deux dispositifs de suivi du regard (*i.e. eye trackers*) utilisés dans les différentes expérimentations de ce travail de recherche.

3.3 Les dispositifs d'*eye tracking*

Les *eye trackers* se répartissent en deux catégories principales : les mobiles (ou portés) et les fixes (ou déportés). Les *eye trackers* mobiles ressemblent à des lunettes (figure 24a) et permettent une grande liberté de mouvements de la tête. Les *eye trackers* fixes sont de petites caméras (généralement disposées dans une barre, figure 24d) que l'on place en dessous d'un écran d'ordinateur. Pour les travaux de recherche présentés ici, nous avons utilisé deux systèmes distincts. Lors des expérimentations sur simulateur, nous avons utilisé l'*eye tracker* mobile Pertech® (50Hz) et à l'inverse, nous avons utilisé un EyeTribe® (30Hz) lors des expérimentations sur micromonde. Nous avons utilisé deux *eye trackers* car chacun offre un cadre d'utilisation différent. Il existe effectivement des disparités dans le traitement et l'accès aux données oculaires et notamment, l'utilisation de l'*eye tracker* Pertech n'a pas été aisée. Contrairement à l'EyeTribe qui permet de récupérer les données facilement à l'aide d'un kit de développement logiciel SDK (Software Development Kit), l'*eye tracker* Pertech a nécessité le développement de petites

briques logicielles pour obtenir des données exploitables correctement. Aussi bien pour le post-traitement des données que l'utilisation des données en temps réel, nous avons dû utiliser des solutions logicielles qui reposaient sur la bibliothèque OpenCV et sur des algorithmes permettant de faire des projections de données entre différents référentiels (homographie) ou de réaliser du traitement vidéo tels que SURF (Bay, Ess, Tuytelaars, & Van Gool, 2008). Ces traitements complexes ont permis d'utiliser l'*eye tracker* Pertech (50Hz) en temps réel mais au prix d'un échantillonnage réduit à 30 données par secondes. Néanmoins, cet échantillonnage de 30Hz était suffisant (Dalmaijer, 2014) pour permettre l'utilisation du PilotGazeTrainer, aussi bien avec l'EyeTribe qu'avec l'*eye tracker* Pertech. Le processus de traitement des données oculaires en temps réel est détaillé dans l'étude de [Dubois, Blättler, Camachon, & Hurter \(2015\)](#)³.

Concernant les analyses post-traitement, nous les avons réalisées avec le logiciel libre *Open Gaze and Mouse Analyzer* (OGAMA, ; Voßkühler, Nordmeier, Kuchinke et Jacobs, 2008).

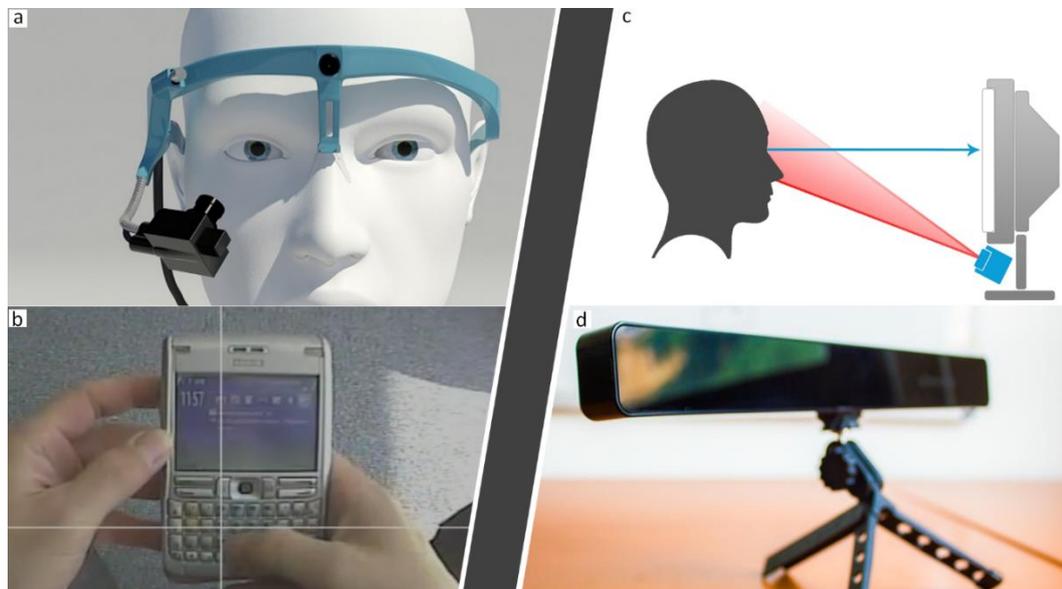


Figure 24 – Différents *eye trackers* fixes et mobiles. (a) Exemple d'*eye tracker* mobile. (2017) ; Repérée à <http://eol.scicog.fr/actualites/actualite.html>. (b) Exemple de direction oculaire donnée par un *eye tracker* mobile. (2017). Repérée à <http://www.dailymotion.com/video/x5esdr>. (c) Schéma d'un *eye tracker* fixe sous un écran d'ordinateur. (2017). Repérée à <http://www.makinggames.biz/feature/use-your-eyes-interaction-through-eye-tracking,7117.html>. (d) Exemple d'*eye tracker* fixe. (2017). Repérée à <http://www.brainsigns.com/en/science/s2/technologies/eyetracker>.

³ Disponible à l'adresse <https://hal-enac.archives-ouvertes.fr/hal-01166484/document>

Les paragraphes qui suivent, détaillent le scénario d'apprentissage du PiGaT que nous avons choisi de tester afin de valider expérimentalement le fonctionnement de notre nouvelle méthode d'éducation du comportement oculaire.

3.4 Scénario PiGaT d'amélioration de la surveillance du ciel

Afin de valider expérimentalement les différents concepts et outils développés, nous avons conçu un premier scénario d'apprentissage. Ce scénario avait comme vocation l'élimination de la mauvaise habitude de trop regarder dans le cockpit afin d'éduquer le comportement oculaire en direction des consignes dictées par les autorités de sécurité des vols, à savoir, de regarder environ 70% du temps à l'extérieur du cockpit (FAA, 1998). Pour cela, nous nous sommes basés sur une consigne que les instructeurs-pilotes donnent régulièrement à leurs élèves : « Ne pas regarder plus de 2 secondes d'affilée dans le cockpit ». Cette consigne a donné la règle comportementale de ce premier scénario d'apprentissage que nous avons décliné sur simulateur et sur le micromonde AFT dans lequel les participants ont tendance à trop regarder la tâche de *monitoring* (« en bas »).

3.4.1 Configuration du scénario du PiGaT pour le micromonde AFT

Nous avons créé une règle simple permettant de faire apparaître un voile opaque sur toute la zone de l'écran occupée par la tâche de *monitoring* (Zone « Bas »), dès lors qu'un participant passait plus de 2 secondes à regarder dans cette zone (figure 25). Cette règle est définie comme suit :

« SI (GD_{ZBas} >= 2000ms) ALORS

ZBas se colore en orange avec 100% d'opacité »

La figure 25 montre le micromonde AFT augmenté de la notification (en orange) définie dans notre scénario d'apprentissage. Comme expliqué précédemment, nous nous sommes inspirés de la pratique des instructeurs-pilotes pour définir ce scénario d'apprentissage. Cette notification peut se rapporter au post-it utilisé dans

certains cas que nous avons illustrés par la figure 9 (cf. 2.2.2.1), mais dans une version automatisée et peu coûteuse pour l'instructeur.

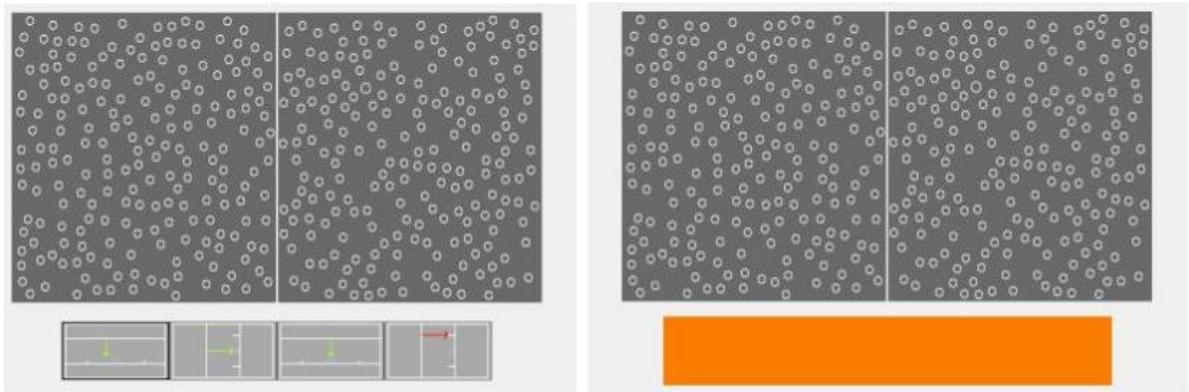


Figure 25 – Captures d'écran présentant à gauche, le micromonde AFT, et à droite, le micromonde AFT augmenté de la notification produite par le PilotGazeTrainer dans le cadre du scénario des « 2 secondes ».

3.4.2 Configuration du scénario du PiGaT pour le simulateur

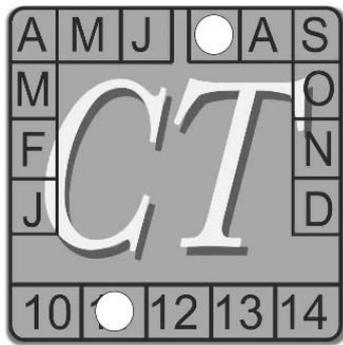
Le principe du scénario du PiGaT pour le simulateur est sensiblement le même que pour l'AFT. Dans cet autre environnement, c'est la zone « Inside » (figure 26) qu'il ne fallait pas regarder plus de deux secondes d'affilée. A partir de cela, nous avons réalisé un premier scénario fournissant une notification visuelle, et un second fournissant une notification sonore. La règle comportementale était donc la même pour ces deux scénarios, seule la notification en cas de dépassement de cette règle était différente. La figure 26 illustre les notifications sonores (26b) et visuelles (26c) dans le simulateur.

Scénario visuel (figure 26c)	« <u>SI</u> (GDZoneInside>= 2000ms) <u>ALORS</u> EcranPFD se colore en noir avec 100% d'opacité »
Scénario sonore (figure 26b)	« <u>SI</u> (GDZoneInside>= 2000ms) <u>ALORS</u> lire le fichier audio contenant le message audio 'look outside' »



Figure 26 – (a) Photographie du simulateur avec la description des deux zones d'intérêt principales. (b) Photographie du simulateur lors du déclenchement de la notification sonores symbolisée par le haut-parleur. (c) Photographie du simulateur lors de l'apparition de la notification visuelle cachant l'écran du PFD (écran en bas à gauche).

Afin de valider expérimentalement l'utilisation des différents éléments décrits dans ce présent chapitre (*i.e.* environnements expérimentaux, dispositifs d'*eye tracking* et scénario d'apprentissage du PilotGazeTraining), nous avons conduit deux premières expérimentations. Celles-ci, décrites ci-après, font office de précaution méthodologique et avaient comme objectif l'évaluation de l'utilisation de ces différents outils (domaine des Interactions Homme-Machine).



Chapitre 4

Validations expérimentales : des vérifications essentielles

Ce quatrième chapitre présente les deux expérimentations qui nous ont permis de valider expérimentalement (1) la viabilité technique du PiGaT (Expérimentation 1), (2) le bon fonctionnement (*i.e.* la capacité à modifier durablement le comportement oculaire) de notre méthode d'éducation du comportement oculaire en situation dynamique et complexe (Expérimentation 2), et enfin (3) la validité écologique du micromonde AFT (Expérimentation 2).

4.1 Expérimentation 1 : La viabilité technique du PiGaT sur simulateur

Une première expérimentation a été réalisée afin de vérifier que les choix de conception du PilotGazeTrainer étaient compatibles avec une utilisation en simulateur. Cette vérification était nécessaire en raison de la difficulté que

représente l'analyse – en temps-réel – des données oculaires fournies par l'*eye tracker* mobile Pertech (cf. 3.3.2). Une manière de valider la viabilité du PiGaT, c'est-à-dire de l'ensemble de la chaîne de traitement des données oculaires (i.e., transformation des données oculaires de l'*eye tracker* Pertech ; réception des données ; analyse du comportement oculaire ; production de notifications), a consisté à évaluer si l'apparition des notifications avait une influence sur le comportement des personnes les recevant. Pour conduire ces tests, nous nous sommes appuyés sur le scénario du PiGaT conçu pour éliminer « la mauvaise habitude de trop regarder à l'intérieur du cockpit » (cf. 3.4). Pour rappel, ce scénario déclenche une notification dès lors que le regard reste posé plus de 2 secondes sur les instruments du cockpit. Le résultat attendu est que, si le PiGaT fonctionne comme il se doit, alors les participants, incités à moins regarder à l'intérieur du cockpit pour ne pas déclencher de notifications, devrait en toute logique passer davantage de temps à regarder à l'extérieur du cockpit.

4.1.1 Méthode

4.1.1.1 Participants

Quinze élèves de l'École de l'air ont participé à cette expérimentation. Ils comptabilisaient une expérience de vol allant de 5 à 100 heures de vol (moyenne = 37 ; SD = 22.58) et leur âge variait entre 21 et 27 ans (moyenne = 22.4 ; SD = 1.99).

4.1.1.2 Matériels

Le simulateur de Cirrus SR20 et l'*eye tracker* mobile Pertech ont été utilisés dans cette expérimentation (cf. 3.1 & 3.3). Les participants étaient assis dans un siège à 70cm des écrans affichant le cockpit et aucune mentonnière n'a été utilisée. Nous avons utilisé une calibration de l'*eye-tracker* en 8 points. Ces points étaient situés sur l'écran du PFD (*Primary Flight Display*) au niveau des principales informations (e.g. puissance moteur, inclinaison, vitesse, altitude, cap, etc.).

4.1.1.3 Tâche

Les participants devaient réaliser une navigation en vol à vue (VFR) allant de Ajaccio à Solenzara (Corse, France) en maintenant une vitesse constante de 120kt et en suivant les instructions données par l'expérimentateur (*i.e.* changement de cap ou d'altitude).



Figure 27 - Photographie du simulateur Cirrus SR20 utilisé pour cette expérimentation

4.1.1.4 Procédure

Les participants étaient répartis aléatoirement dans trois groupes expérimentaux (Contrôle ; Visuel ; Sonore) puis installés devant le simulateur. La consigne de sécurité de ne pas regarder à l'intérieur du cockpit (*i.e.* PFD et MFD, figure 27) plus de 2 secondes d'affilée était donnée à tous les participants. L'*eye tracker* était ensuite calibré. Puis, les participants prenaient le contrôle de l'avion à partir d'une position de départ commune où l'avion était déjà en vol. Après une première branche (*i.e.* segment de vol dans un plan de vol) dédiée à la familiarisation avec le simulateur (*i.e.* réactions des commandes), les participants exécutaient 31 autres branches en suivant les consignes données oralement. Ces instructions étaient données toutes les minutes, en respectant la phraséologie des instructeurs-pilotes et correspondaient à une altitude à atteindre et un cap à tenir tout en conservant la vitesse constante (120kt).

Durant le vol, le groupe contrôle ne recevait aucun feedback. A l'inverse, les deux autres groupes recevaient des notifications visuelles ou sonores de la part du PiGaT dès lors que le temps passé à regarder à l'intérieur du cockpit dépassait 2 secondes. Pour rappel, la notification sonore était la synthèse vocale du conseil de regarder dehors « *look outside* » (condition sonore). La notification visuelle (condition visuelle) consistait à cacher tout l'écran du PFD à l'aide d'un voile noir opaque. Le message audio était répété jusqu'à ce que le participant regarde ailleurs que dans le PFD. De la même manière, le feedback visuel cachait l'écran jusqu'à ce que le participant regarde ailleurs.

Dans cette première expérimentation, nous nous sommes centrés principalement sur deux mesures : la proportion de temps passé à regarder à l'extérieur du cockpit et la fréquence de « violation de la règle des 2 secondes » (y compris pour le groupe Contrôle qui ne recevait pas de notifications).

4.1.2 Résultats

Des analyses de la variance (ANOVA) ont été conduites avec le facteur "Groupe" (Contrôle ; Visuel ; Sonore) comme facteur inter-groupe sur les deux mesures présentées.

4.1.2.1 Proportion de temps passé à regarder à l'extérieur du cockpit

Une première ANOVA a été réalisée sur la proportion de temps passé à regarder à l'extérieur du cockpit (« outside world », figure 27). Les résultats montrent un effet significatif du facteur Groupe : $F(2,12) = 3.91$; $MSE = 642.78$; $p = .04919$. Le groupe Contrôle a regardé l'extérieur du cockpit en moyenne 37.62% du temps ($SE = 6.401$), le groupe Sonore 58.66% du temps ($SE = 3.593$) et le groupe Visuel 55.45% du temps ($SE = 6.684$). La figure 28 illustre cette mesure pour les trois groupes expérimentaux.

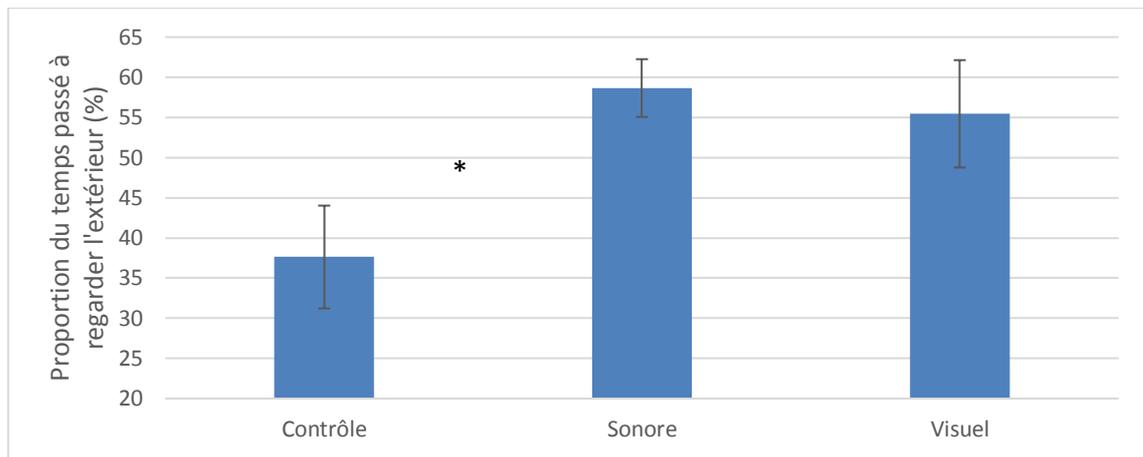


Figure 28 - Proportion de temps passé à regarder à l'extérieur du cockpit pour les trois groupes expérimentaux (Contrôle, Sonore, Visuel). Les barres d'erreur présentent les erreurs standards.

Nous avons réalisé une comparaison planifiée entre la proportion de temps passé à regarder à l'extérieur du cockpit du groupe Contrôle et celle des groupes ayant reçu des notifications du PiGaT (*i.e.* Visuel et Sonore). Les résultats de cette comparaison montrent que le groupe Contrôle regarde moins l'extérieur du cockpit que les deux autres groupes ayant bénéficié des notifications du PiGaT, $F(1,12) = 7.667868$; $MSE = 1259.845$; $p = .01699$. Les notifications produites grâce au fonctionnement adéquat du PilotGazeTrainer semblent bien influencer le comportement oculaire des personnes qui les reçoivent.

4.1.2.2 Fréquence de violation de la règle des « 2 secondes ».

Nous avons également mesuré le nombre de violation de la « règle des 2 secondes », par minute. Les résultats de l'ANOVA montrent un effet significatif du facteur Groupe : $F(2,12) = 8.00101$; $MSE = 23.1545$; $p = .006194$. En moyenne, le groupe Contrôle a déclenché cette règle 6.37 fois/min ($SE = 0.6619$), le groupe Sonore 2.82 fois/min ($SE = 0.3737$) et le groupe Visuel 2.49 fois/min ($SE = 1.076$). La figure 29 illustre graphiquement ces mesures.

Les comparaisons planifiées réalisées entre la fréquence de violation de la « règle des 2 secondes » du groupe Contrôle et celle des groupes ayant reçu des notifications du PiGaT (*i.e.* Visuel et Sonore) montrent que le groupe Contrôle déclenche davantage cette règle que les deux autres groupes, $F(1,12) = 15.90850$; $MSE = 46.03836$; $p = .001798$.

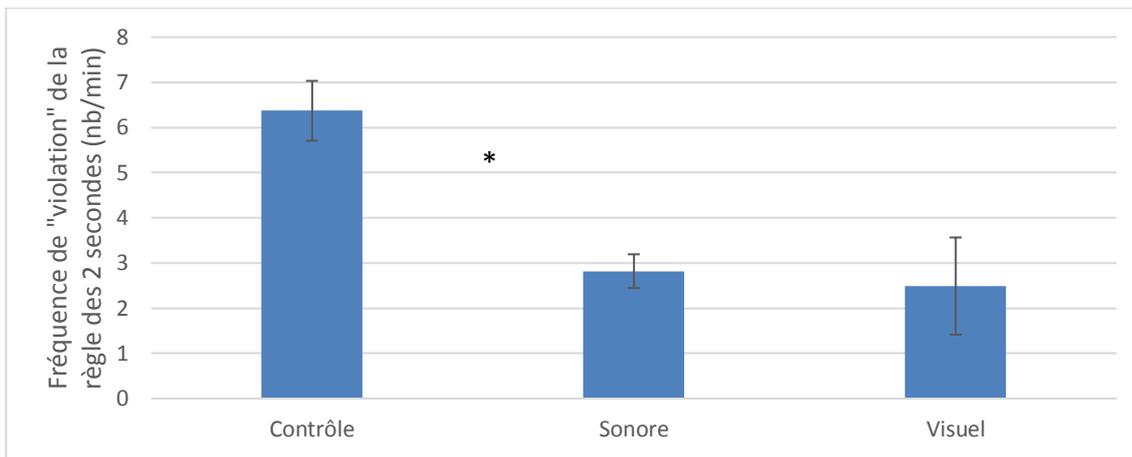


Figure 29 – Fréquence de “violation” de la règle comportementale des “2 secondes” par minute pour les groupes Expérimentaux (*i.e.* Contrôle, Sonore, Visuel). Les barres d’erreur présentent les erreurs standards.

4.1.3 Synthèse de cette première évaluation expérimentale

Cette première expérimentation a permis de démontrer qu’il était possible d’analyser le comportement oculaire en temps réel à l’aide d’un *eye tracker* mobile dans un simulateur. Des données oculaires conformes ont été envoyées au PilotGazeTrainer qui est parvenu à identifier correctement quand les participants regardaient trop longtemps dans le cockpit.

Un deuxième résultat concerne l’influence des notifications produites sur le comportement oculaire des participants. Bien que cette expérimentation ne permette pas de conclure sur un potentiel apprentissage, nous avons pu observer que les notifications modifiaient le comportement oculaire naturel des participants indépendamment de la modalité de la notification. En comparaison au groupe Contrôle, les deux groupes expérimentaux ont ainsi significativement regardé davantage à l’extérieur du cockpit et ont significativement moins déclenché la « règle des 2 secondes ». Autrement dit, sans intervention « pédagogique », le comportement naturel (groupe Contrôle) est de regarder moins de 40% du temps l’extérieur du cockpit alors qu’à l’inverse, les personnes qui ont bénéficié des notifications du PiGaT ont regardé à l’extérieur du cockpit à hauteur de 60% du temps.

Afin d'aller plus loin dans ces évaluations expérimentales, notamment sur l'aspect de la durabilité de la modification comportementale induite par ces notifications, nous avons réalisé une seconde expérimentation. Cette dernière a été réalisée sur le micromonde AFT et sur une population de non-pilote afin de ne pas exposer les élèves-pilotes à d'éventuelles modifications comportementales durables dont nous n'avions pas vérifié, au préalable, tous les tenants et aboutissants.

4.2 Expérimentation 2 : L'évaluation de la méthode d'éducation du comportement oculaire sur le micromonde AFT

Cette deuxième expérimentation a été réalisée avec deux objectifs principaux. Le premier était de vérifier la valeur écologique du micromonde AFT. Pour cela, nous avons tout d'abord cherché à vérifier que le micromonde AFT était suffisamment complexe et engageant, et que les comportements oculaires observés durant la pratique de ce dernier étaient également cohérents avec la littérature sur le pilotage (cf. 2.1.1). Le second objectif était de vérifier que notre méthode d'éducation, basée sur l'affichage des notifications via l'analyse temps-réel du comportement oculaire par le PiGaT, permettait bien **l'apprentissage** (i.e., changement de comportement durable dans le temps) d'un nouveau comportement oculaire durant la pratique d'une tâche dynamique et complexe.

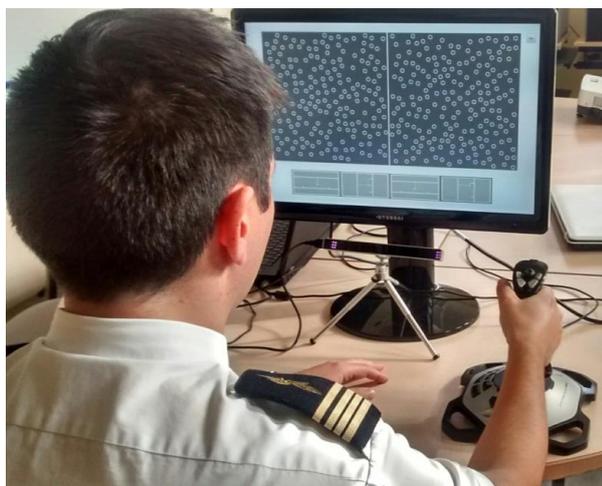


Figure 30. Dispositif mis en œuvre pour permettre l'éducation du comportement oculaire, comprenant un écran affichant le micromonde AFT en fond ainsi qu'un joystick pour la réalisation de cette tâche, et également d'un *eye tracker* (EyeTribe) envoyant des données au PiGaT. Cette photo a été prise lors de la réalisation d'un pré-test avec un Commandant de l'Armée de l'air.

4.2.1 Méthode

4.2.1.1 Participants

Quatre-vingt-un étudiants de l'université d'Aix-en-Provence ont participé à notre étude. L'échantillon comprend 14 hommes et 67 femmes dont l'âge varie de 17 à 29 ans (moyenne = 19, SD = 2.2). Aucun participant n'avait déjà piloté d'aéronef auparavant et tous avaient une vision normale ou corrigée.

4.2.1.2 Matériel

Le dispositif expérimental utilisé (figure 30) comprenait un écran Hyundai W220D 22 pouces avec une résolution de 1680x1050 pixels sur lequel le micromonde AFT était affiché. L'interaction avec le micromonde était réalisée avec le joystick Logitech Extrême 3d Pro. Les participants étaient assis à 60 cm de l'écran. Les données oculaires ont été recueillies grâce à l'EyeTribe® cadencé à 30Hz, placé entre l'écran et le participant, à environ 50cm du participant.

Nous avons utilisé la configuration dite « native » du micromonde AFT qui correspond à l'indice de difficulté 2 (ID2) sur une échelle de 3 (cf. 3.2.2.3). Cette configuration comprend ainsi pour la tâche de *targeting* (recherche visuelle) : 2 zones de recherche, 200 cercles par zones de recherche, dont des distracteurs de 20 pixels, et une cible de 26 pixels (soit 35' et 44' d'arc). Pour la tâche de *monitoring*, le délai d'activation des flèches était de 3,5 secondes et, la vitesse de déplacement des flèches était de 100 pixels par seconde, contre 16 pixels par seconde pour la vitesse de dérive.

Concernant l'utilisation du PiGaT, nous avons utilisé le scénario d'apprentissage des « 2 secondes », adapté au contexte de l'AFT (cf. 3.4.1). Ce scénario consiste à cacher la tâche de *monitoring* du micromonde AFT à chaque fois que cette dernière est regardée plus de 2 secondes d'affilée (figure 31).

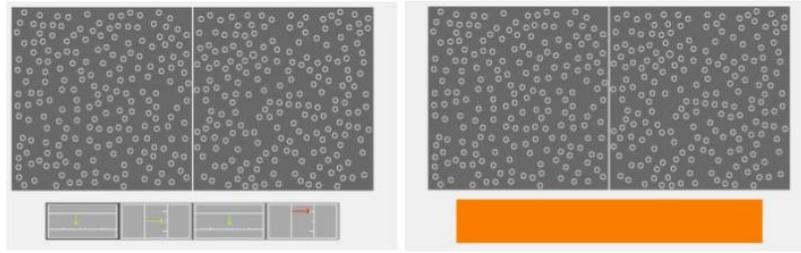


Figure 31. Notification reçue durant l'entraînement par les participants du groupe Full (à droite) à chaque fois que ces derniers passaient plus de 2 secondes d'affilée à regarder la tâche de *monitoring*.

4.2.1.3 Tâche

La tâche consistait à détecter des cibles (cercles plus gros) parmi des distracteurs, tout en gérant la dérive de quatre flèches pendant 2 minutes.

4.2.1.4 Procédure

Les participants ont été répartis en deux groupes expérimentaux : le groupe Contrôle (N = 44) et le groupe Full (N = 37). L'expérimentation s'est déroulée en 5 phases : (i) une phase de familiarisation aux tâches, (ii) une phase de pré-test, (iii) une phase d'entraînement, (iv) une phase de post-test, et (v) 24h plus tard une phase de test de rétention.

Lors de la phase de familiarisation (i), les participants réalisaient, dans l'ordre, la tâche de gestion des flèches, la tâche de recherche visuelle et, les deux tâches simultanément. Les sessions étaient de 30 secondes. Cette phase permettait aux participants de comprendre le mode de fonctionnement du joystick.

Lors des phases de pré-test (ii), post-test (iv) et rétention (v), les participants réalisaient ces trois tâches dans un ordre aléatoire. Les sessions étaient de 2 minutes.

La phase d'entraînement (iii) comprenait uniquement la double tâche et les sessions étaient de 2 minutes. Les participants du groupe Full étaient les seuls à recevoir la notification à chaque identification de violation de la règle des 2 secondes. Le groupe Contrôle ne recevait aucune notification.

4.2.2 Résultats

Afin de répondre à nos deux principaux objectifs, nous avons conduit des analyses sur trois dimensions principales : (1) les mesures portant sur l'évaluation de la valeur écologique du micromonde AFT (objectif 1), (2) les mesures portant sur l'évaluation de la performance aux tâches de l'AFT et enfin (3) sur les mesures portant sur l'évaluation de l'éducation du comportement oculaire (objectif 2).

Dans le cadre de (1) la vérification de la cohérence du micromonde AFT par rapport à la situation de pilotage d'avion, des analyses de la variance (ANOVA) ont été réalisées sur des variables comportementales uniquement pour le groupe Contrôle. En effet, il était nécessaire d'analyser le comportement oculaire naturel des participants. Le groupe Full a été retiré de ces analyses puisque leur entraînement à la tâche a été réalisé avec l'intervention des notifications du dispositif PiGaT. Ces notifications étant susceptibles d'entraîner des modifications du comportement oculaire de ces personnes, nous ne pouvions donc pas considérer leur comportement comme l'unique résultante de la pratique de la tâche du micromonde AFT. Des ANOVA ont été conduites, pour le groupe Contrôle, sur le facteur "Test" (pré-test ; post-test ; rétention).

Concernant les mesures portant sur l'évaluation (2) de la performance aux tâches de l'AFT et (3) de l'éducation du comportement oculaire, des ANOVA ont été conduites avec le facteur "Groupe" (Contrôle ; Full) comme facteur inter-groupe et le facteur "Test" (pré-test ; post-test ; rétention) comme facteur intra-groupe avec des mesures répétées sur le dernier facteur.

4.2.2.1 Mesures pour l'évaluation de la valeur écologique de l'AFT

La fréquence de fixation (fix/min) : Les résultats de l'ANOVA sur la fréquence de fixation montrent un effet simple significatif du facteur "Test", $F(2,129) = 6.577$, $MSE = 4579$, $p = .001906$. La figure 32 montre l'évolution de cette fréquence de fixation pour le groupe Contrôle lors du pré-test, du post-test et du test de rétention.

Des tests *a posteriori* (Newman-Keuls) montrent que la fréquence de fixation (fix/min) lors du post-test (moyenne = 119.3068, SE = 4.085704) est significativement supérieure à celle lors du pré-test (moyenne = 105.4545, SE = 3.781940), $p = .013806$. La fréquence de fixation lors du test de rétention (moyenne = 125.3523, SE = 4.058198) est également significativement supérieure à celle du pré-test, $p = .001188$, et n'est pas significativement différente de celle du post-test, $p = .282512$. Cette augmentation du nombre de fixations par minute avec la pratique sur l'AFT est cohérente avec la littérature sur le pilotage (cf. 2.1.1).

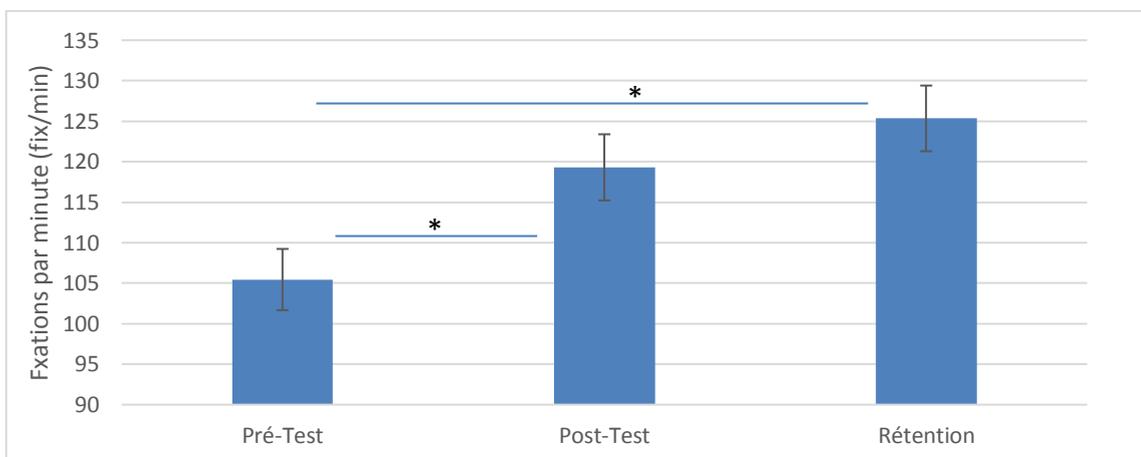


Figure 32 - Graphiques présentant, pour le groupe contrôle uniquement, la fréquence de fixation (le nombre de fixations par minute) durant le pré-test, le post-test et le test de rétention. Les barres d'erreurs correspondent aux erreurs standards.

Durée moyenne des fixations : Les résultats de l'ANOVA sur la durée moyenne des fixations montrent un effet simple significatif du facteur "Test", $F(2,129) = 11.575$, $MSE = 44193$, $p < .001$. La figure 33 illustre les valeurs obtenues par le groupe Contrôle durant le pré-test, le post-test et le test de rétention.

Des tests *a posteriori* (Newman-Keuls) montrent que la durée moyenne des fixations lors du post-test (moyenne = 332.04, SE = 8.69676) est significativement inférieure à celle lors du pré-test (moyenne = 370.47, SE = 12.23032), $p = .00354$. La durée moyenne des fixations lors du test de rétention (moyenne = 307.60, SE = 5.924) est également significativement inférieure à celle lors du pré-test, $p < .001$, et est tendanciellement inférieure à celle lors du post-test, $p = .063517$. De la même manière que le nombre de fixations par minutes, la diminution du temps moyen des

fixations avec la pratique de l'AFT corrobore les résultats de la littérature sur le pilotage (cf. 2.1.1).

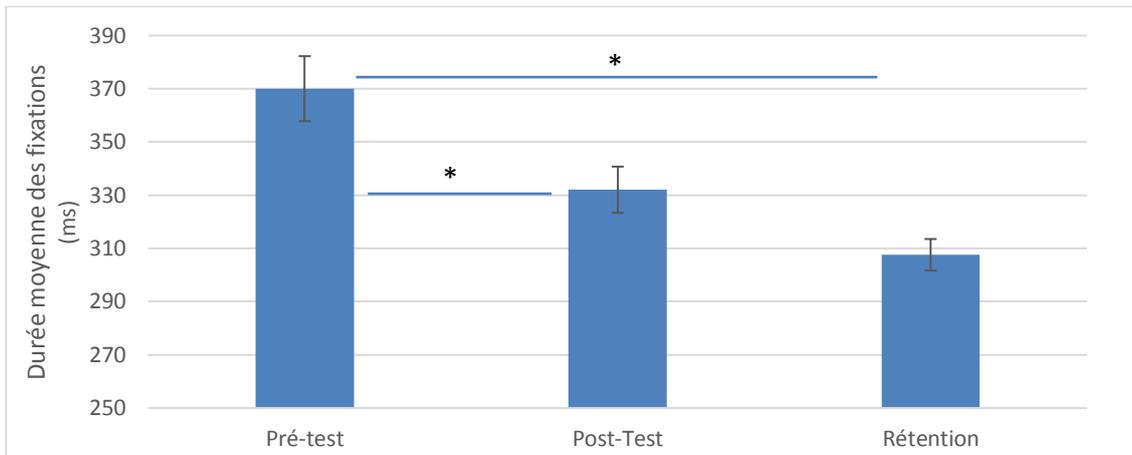


Figure 33 - Graphiques présentant, pour le groupe contrôle uniquement, la durée moyenne de ces fixations en millisecondes durant le pré-test, le post-test et le test de rétention. Les barres d'erreurs correspondent aux erreurs standards.

Durée moyenne des fixations sur les différentes tâches : Un test T de Student (T-test) a été réalisé pour comparer la durée moyenne des fixations sur la tâche de *targeting* et sur la tâche de *monitoring*. Les activités visuelles de ces deux tâches sont différentes et nous avons vérifié que, comme dans la littérature sur le pilotage, cette différence d'activité se traduisait par une différence de temps moyen des fixations. Les résultats montrent une différence significative de durée des fixations sur ces deux tâches, $t(43) = -18.6094$; $p < .001$. La durée moyenne des fixations sur la tâche de *targeting* (moyenne = 234.70, SD = 27,02) est significativement inférieure à la durée moyenne des fixations sur la tâche de *monitoring* (moyenne = 459.62, SD = 73.76). Ce résultat est conforme à ceux observés dans la littérature, entre le cockpit et l'extérieur du cockpit.

4.2.2.2 Mesures de performance aux tâches de l'AFT

Performance à la tâche de monitoring : La performance à la tâche de *monitoring* est un score donné sur 100 (25 par jauge). Il correspond au score moyen obtenu sur l'ensemble de la session. Le score d'une jauge est maximum lorsque la flèche est au centre et diminue de manière linéaire proportionnellement à l'éloignement de la flèche, jusqu'à atteindre 0 au niveau de la dernière graduation. Les résultats de

l'ANOVA à mesures répétées sur la performance à la tâche de *monitoring* montrent un effet simple significatif du facteur "Test", $F(2,158) = 162.1522$; $MSE = 17802.1$; $p < .001$. Les résultats ne montrent pas de différence pour le facteur "Groupe", $F(1,79) = 0.0988$; $MSE = 71.8$; $p = .754$, et il n'y a pas d'interaction Groupe x Test, $F(2,158) = 0.3652$; $MSE = 40.1$; $p = .694$. La figure 34 illustre la performance obtenue par les participants sans distinction de groupe.

Des tests *a posteriori* (Newman-Keuls) sur l'effet simple "Test", montrent que la performance à la tâche de *monitoring* lors du post-test (moyenne = 60.39, SE = 2.227) est significativement supérieure à celle lors du pré-test (moyenne = 34.597, SE = 1.423), $p < .001$. La performance lors du test de rétention (moyenne = 60.347, SE = 2.1869) est également significativement supérieure à celle lors du pré-test, $p < .001$, mais n'est pas significativement différente de celle obtenue lors du post-test, $p > .1$.

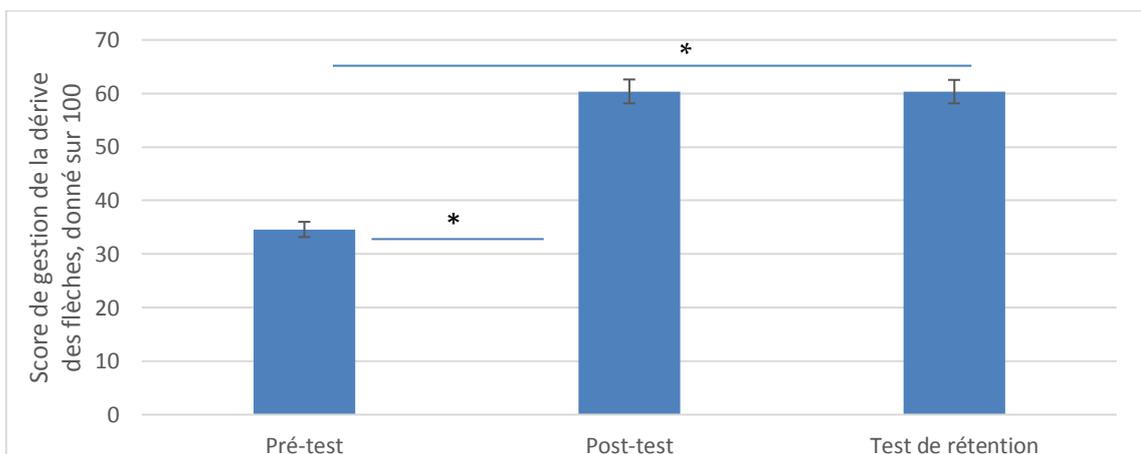


Figure 34 - Graphique présentant le score à la tâche de *monitoring* obtenue par les participants, sans distinction de groupe, lors du pré-test, post-test et test de rétention. Les barres d'erreurs correspondent aux erreurs standards.

Performance à la tâche de targeting : La performance à la tâche de *targeting* (figure 35) est calculée en pourcentage de bonnes réponses par rapport au nombre de scènes visualisées. Les résultats de l'ANOVA à mesures répétées montrent uniquement un effet simple significatif du facteur "Test", $F(2, 158) = 68.412$; $MSE = 11042.1$; $p < .001$. Les résultats ne montrent pas d'effet significatif pour le facteur "Groupe", $F(1,79) = 0.331$; $MSE = 160.8$; $p = .566$, et il n'y a pas d'interaction Groupe x Test, $F(2, 158) = 1.304$; $MSE = 210.4$; $p = .274$.

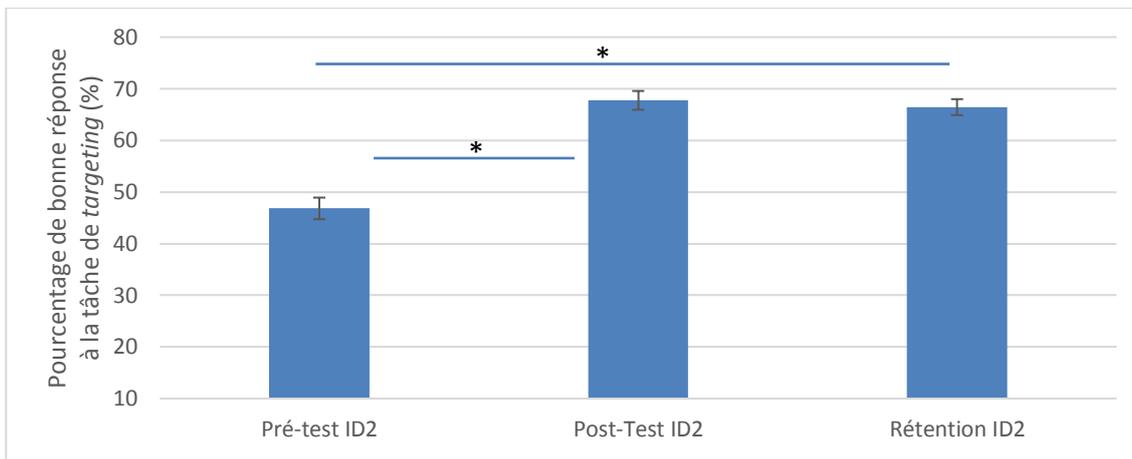


Figure 35 - Graphique présentant la performance à la tâche de *targeting* (i.e. pourcentage de bonnes réponses) obtenue par les participants, sans distinction de groupe, lors du pré-test, post-test et test de rétention. Les barres d'erreurs correspondent aux erreurs standards.

Des tests *a posteriori* (*Newman-Keuls*) sur l'effet simple "Test", montrent que la performance à la tâche de *targeting* lors du post-test (moyenne = 67.75, SE = 1.82) est significativement supérieure à celle lors du pré-test (moyenne = 46.83, SE = 2.087), $p < .001$. La performance à la tâche *targeting* lors du test de rétention (moyenne = 66.44, SE = 1.547) est également significativement supérieure à celle lors du pré-test, $p < .001$, mais n'est pas significativement différente de celle obtenue lors du post-test, $p > .1$.

Avec l'entraînement, tous les groupes se sont donc améliorés, tant sur la tâche de *targeting* que sur celle de *monitoring*.

4.2.2.3 Evaluation de l'éducation du comportement oculaire

Proportion de temps passé à regarder la tâche de recherche visuelle (%) : Cette mesure est calculée à partir du temps de fixations sur la tâche de recherche visuelle par rapport au temps total de fixation. La figure 36 illustre l'évolution de cette proportion pour les deux groupes expérimentaux durant le pré-test, le post-test et le test de rétention. Les résultats de l'ANOVA à mesures répétées sur cette proportion montrent un effet significatif des facteurs "Groupe", $F(1,79) = 13.7313$; $MSE = 8564,2$; $p < .001$, et "Test", $F(2,158) = 13.0535$; $MSE = 1822,6$; $p < .001$, ainsi qu'un effet d'interaction, $F(2,158) = 4.86$; $MSE = 678.6$; $p = .008945$.

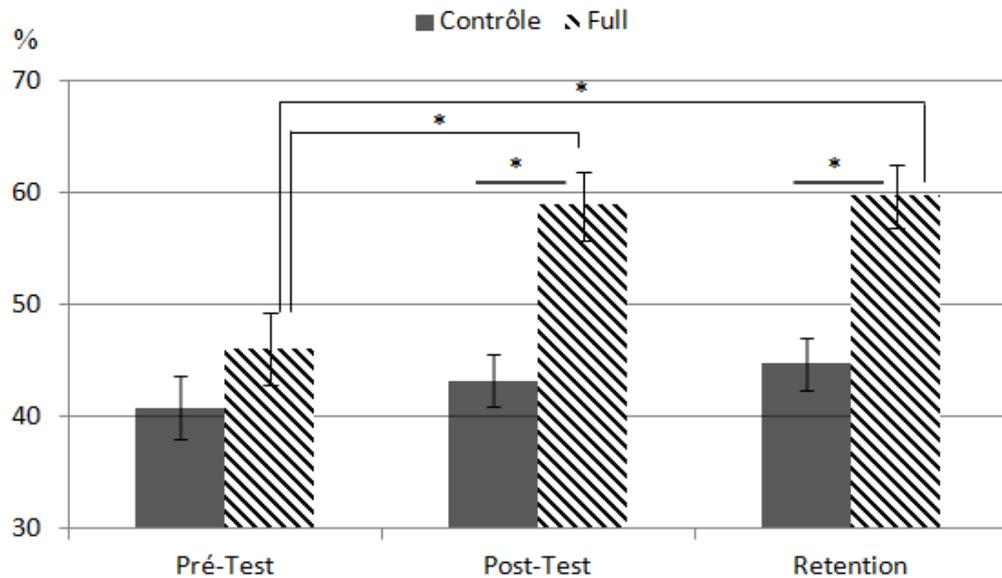


Figure 36. Graphique présentant la proportion de temps passé à regarder la tâche de *targeting* (%) avec les erreurs types, pour le groupe Contrôle (noir) et le groupe Full (rayé), durant les sessions de pré-test, post-test et test de rétention. Les barres d'erreurs correspondent aux erreurs standards.

Des tests *a posteriori* (*Newman-Keuls*) montrent tout d'abord que les deux groupes ne sont pas significativement différents lors du pré-test, $p > .1$ (**Contrôle** : moyenne = 40.83, SE = 2.82 ; **Full** : moyenne = 46.04, SE = 3.08). Par ailleurs, alors que la proportion du temps passé à regarder la tâche de *targeting* n'est, pour le groupe Contrôle, pas significativement différente entre le pré-test et le post-test (moyenne = 43.25, SE = 2.58), $p > .1$, le groupe Full regarde significativement plus cette tâche en post-test (moyenne = 58.83, SD = 18.43) que lors du pré-test, $p < .001$. De plus, le groupe Full passe significativement plus de temps que le groupe Contrôle à regarder la tâche de *targeting* lors du post-Test, $p = .001$. Contrairement au groupe Contrôle, le groupe Full a donc modifié son comportement oculaire entre le pré-test et le post-test.

Cette modification comportementale perdure dans le temps puisque lors du test de rétention, la proportion du temps passé à regarder la tâche de *targeting* pour le groupe Full (moyenne = 59.68, SE = 2.645) est également significativement supérieure à celle du pré-test, $p < .001$, et n'est pas significativement différente de celle du post-test, $p > .1$. De plus, le groupe Full regarde significativement plus la tâche de *targeting* que le groupe Contrôle lors du test de rétention, (moyenne = 44.72, SE = 2.4259), $p = .002$. Enfin, la proportion de temps passé à regarder la tâche de

targeting du groupe Contrôle lors du test de rétention n'est significativement différente ni du pré-test ($p > .1$), ni du post-test ($p > .1$).

4.2.3 Discussion

Cette deuxième expérimentation avait pour objectifs principaux (1) de vérifier la valeur écologique du micromonde AFT et (2) de vérifier que notre méthode d'éducation permettait bien l'**apprentissage** d'un nouveau comportement oculaire durant la pratique d'une tâche dynamique et complexe.

Concernant le premier objectif, les analyses sur les mesures de validation de l'AFT ont permis une première évaluation positive de ce micromonde par rapport à la situation réelle qu'il visa à reproduire partiellement (*i.e.* le pilotage). Le comportement naturel des participants lors du pré-test était de regarder la tâche de *monitoring* (gestion des flèches) 60% du temps contre 40% pour la tâche de *targeting* (recherche visuelle). Sans intervention de notre part (*i.e.* groupe Contrôle) et malgré un entraînement libre à la tâche, ce comportement perdure dans le temps (*i.e.*, post-test et rétention). Dans le cadre de cette configuration native du micromonde AFT, la tâche de *monitoring* attire davantage le regard des participants, ce qui correspond à un comportement similaire au « *too much head-down time* » identifié sur avion. D'autre part, les caractéristiques des fixations oculaires (*i.e.*, nombre et durée moyenne) évoluent, au cours du temps (pré-test vs. test de rétention), également de manière similaire à ce qui est classiquement observé dans le pilotage (Wang, Li *et al.*, 2015) : le nombre de fixations augmente et la durée moyenne de ces fixations diminue. Cela suggère que les participants ont adopté une stratégie visuelle qui les engage à balayer plus souvent mais moins longtemps leur environnement. Ce résultat corrobore ceux décrits dans la littérature concernant l'influence du niveau d'expertise sur le comportement oculaire des pilotes (Kasarski *et al.*, 2001). L'analyse des durées des fixations dans les deux tâches du micromonde montre que, comme dans le pilotage d'un avion (Robinski *et al.*, 2013 ; Sullivan *et al.*, 2011), les participants ont proportionnellement une durée moyenne des fixations plus

importante sur la tâche de *monitoring* (cockpit) que sur la tâche de *targeting* (extérieur). Des tests plus poussés devront bien évidemment être conduits afin de valider les possibilités offertes par ce micromonde à l'instar du NASA-MATB et de *Space Fortress*. Mais les premiers résultats sont encourageants et aucune incohérence avec la situation de pilotage n'a été décelée. Cette consistance avec les résultats de la littérature du domaine positionne le micromonde AFT comme un outil pertinent permettant l'étude, sur ordinateur, d'une partie de l'activité de pilotage d'un avion. Il pourrait même être considéré comme un outil d'éducation du comportement oculaire à part entière. En effet, par la seule pratique libre de cette tâche, la vitesse du comportement oculaire (au sens de notre modélisation) est augmentée, tout en garantissant une grande flexibilité de ce comportement due aux nombreux changements aléatoires de l'environnement visuel.

Le deuxième point concerne l'évaluation de la méthode d'éducation du comportement oculaire que nous proposons via le PilotGazeTrainer (PiGaT). Le scénario conçu avec le PiGaT a créé une situation d'apprentissage propice à l'éducation d'un comportement oculaire privilégiant une attention visuelle dirigée vers la tâche de *targeting*. Le résultat important à noter est que cette modification comportementale est durable et a été obtenue en très peu de temps grâce à la pratique « dirigée » d'une tâche dynamique et complexe. En effet, avec seulement 6 fois 2 minutes d'entraînement, le groupe ayant bénéficié du scénario du PiGaT a pu inverser la tendance naturelle à trop regarder la tâche de *monitoring*, et adopter une répartition du regard à 60% environ sur la tâche de *targeting*. Il est également à noter que cette modification comportementale n'a pas entraîné de diminution de la performance. Ce résultat est intéressant car il est assez fréquent dans le domaine de l'apprentissage d'observer une phase de régression des performances lors d'une modification comportementale profonde.

Grâce à un scénario simple, l'environnement d'apprentissage permis par le PiGaT a entraîné une modification durable d'un comportement oculaire (*i.e.* une mauvaise habitude) lors de la réalisation d'une tâche dynamique et complexe. En raison de sa

capacité à pouvoir générer autant de règles que nécessaire, il est possible d'imaginer des scénarios bien plus complexes permettant d'éduquer d'autres aspects du comportement oculaire (*e.g.* les autres composantes de comportement de référence). Dans cette perspective et dans notre volonté de fournir aux instructeurs de l'Armée de l'air des outils d'aide efficaces pour l'enseignement du comportement oculaire, le logiciel PiGaT pourrait être une solution pertinente. Améliorer cette éducation du comportement oculaire dès la formation initiale devrait optimiser le temps de formation et ainsi peut-être, accélérer le développement de l'expertise des élèves (Bellenkes *et al.*, 1997).

4.3 Conclusions des validations expérimentales

Dans ce chapitre, nous avons décrit les deux expérimentations réalisées dans l'unique but de valider expérimentalement un certain nombre de points « techniques ». Nous avons ainsi démontré qu'il était possible d'utiliser le PiGaT dans un simulateur avec un *eye tracker* mobile. Puis, nous avons montré que le micromonde AFT était écologiquement valide par rapport à la situation de pilotage qu'il est censé partiellement reproduire. Enfin, nous avons montré que donner du feedback en temps réel sur la base de scénarios simples permet bien de modifier durablement le comportement oculaire au cours de la pratique d'une tâche dynamique et complexe. Le fait que cette méthode d'éducation soit adaptée à ce type de situation (*i.e.* dynamique et complexe) permet d'envisager son utilisation dans la situation de pilotage pour laquelle les méthodes d'éducation existantes (cf. 1.2.1) ne convenaient pas. Le PiGaT contribue ainsi au développement de méthodes innovantes d'entraînement du comportement oculaire qui pourraient trouver des applications dans de nombreux autres domaines (*e.g.* conduite automobile, contrôle aérien, etc.).

Le scénario d'apprentissage des « 2 secondes » a également montré sa pertinence pour lutter contre la mauvaise habitude de (i) regarder davantage la tâche de *monitoring* dans le micromonde AFT ainsi que (ii) celui de trop regarder dans le

cockpit sur simulateur d'avion. Il serait, de fait, intéressant de vérifier le transfert d'apprentissage entre le micromonde AFT et un simulateur ou d'évaluer si la modification comportementale obtenue sur le simulateur est durable dans le temps, autrement dit, s'il y a également apprentissage d'un comportement oculaire plus efficace.

Partie III
Expérimentations



Chapitre 5

Evaluation des bénéfices apportés par notre nouvelle méthode d'éducation

5.1 Introduction

Ce chapitre présente une campagne d'expérimentation visant à évaluer les propriétés de notre méthode d'éducation du comportement oculaire. Les résultats des tests précédents ont montré que donner du feedback en temps réel durant la réalisation d'une tâche dynamique et complexe permettait de modifier durablement le comportement oculaire. Sur une tâche de laboratoire (le micromonde AFT), un scénario d'apprentissage conçu avec le PilotGazeTrainer a notamment permis aux personnes en ayant bénéficié, de mieux répartir leur regard. Sans intervention extérieure, la tendance naturelle des participants est de regarder seulement 40% du temps la tâche de recherche visuelle (*targeting*) du micromonde AFT. Le scénario d'apprentissage a permis d'élever la répartition du temps de fixation à hauteur de 60% pour cette même tâche. Par la proximité du micromonde AFT avec la situation de pilotage en vol à vue, nous considérons que regarder davantage la tâche de

recherche visuelle est un meilleur comportement. Cependant rien ne semble vérifier formellement cette affirmation et aucune différence n'a été observée sur la performance à la tâche. Les deux groupes expérimentaux (Contrôle vs. Full) ont atteint un niveau élevé de performance sur le micromonde AFT. Avec cette seule première observation, il est donc difficile de conclure sur un potentiel apport de bénéfices de cette éducation du comportement oculaire pour le groupe concerné. C'est pourquoi nous avons souhaité aller plus loin en réalisant une expérimentation visant à démontrer l'apport de notre méthode en termes de gain de performance.

Dans cette nouvelle étude, nous avons tout d'abord cherché à (1) reproduire la modification/éducation du comportement oculaire obtenue lors de la dernière expérimentation décrite au chapitre 4 (i.e., Expérimentation 2), puis, à (2) évaluer expérimentalement les bénéfices que cette éducation apporte aux personnes concernées, et enfin (3) à évaluer la valeur écologique de « nouvelles » configurations du micromonde AFT (i.e. non encore utilisées lors d'une expérimentation) au regard de la situation de pilotage.

L'évaluation de l'apprentissage suite à un entraînement spécifique est une question cruciale. Comme expliqué en fin de chapitre 1 (cf. 1.2.2.2), cette évaluation constitue la dernière étape permettant d'affirmer que l'éducation du comportement oculaire que nous proposons est réellement bénéfique et pertinente. Lors de la conception de notre méthode d'éducation, nous avons réfléchi aux aspects pertinents à évaluer (cf. 2.3), à savoir, l'évaluation (i) de la performance, (ii) des connaissances généralisables, (iii) de la conscience de son propre comportement oculaire et (iv) de la faculté d'adaptation. Trois de ces quatre aspects ont été questionnés dans cette nouvelle étude. En effet, nous nous sommes demandés dans un premier temps si l'éducation du comportement oculaire permettait d'obtenir une meilleure performance sur une tâche dynamique et complexe. Dans l'expérimentation précédente, aucune différence significative n'avait été observée avec la configuration d'indice de difficulté 2 sur une échelle de 3 (cf. 3.2.2.3). Nous avons émis l'hypothèse que cette configuration n'était peut-être pas suffisamment difficile

pour permettre de faire apparaître le bénéfice d'une éducation d'un comportement oculaire sur la performance à la tâche. C'est pourquoi nous avons souhaité évaluer l'effet de cette éducation sur la performance dans une configuration plus complexe de l'AFT (ID3+).

Le deuxième aspect que nous souhaitions questionner concernait la conscience qu'avaient les participants de leur comportement oculaire. Pour cela, nous avons élaboré un questionnaire permettant de nous entretenir avec ces participants sur ce sujet à la fin de leur participation. Les retranscriptions n'ont cependant pas encore été terminées, aucun élément de réponse concernant cet aspect ne sera ainsi discuté dans ce chapitre.

Enfin, le dernier aspect retenu concernait l'effet de cette éducation du comportement oculaire en termes d'amélioration de la faculté d'adaptation à des situations plus complexes. Afin d'évaluer ce dernier point, nous nous sommes appuyés sur une méthodologie proposée dans la littérature sur l'expertise adaptative ou *adaptive expertise* en anglais.

La littérature sur l'expertise adaptative remonte à une trentaine d'années (Hanato & Inagaki, 1986), ce qui est relativement récent dans le champ de l'expertise. Son principe est défini comme une troisième génération de théories sur la construction de l'expertise (Holyoak, 1991). Selon Holyoak, la première génération de théories est expliquée par les premiers travaux sur l'expertise (De Groot, 1965 ; Chase & Simon, 1973 ; Newell & Simon, 1972) définissant, globalement, l'expert comme ayant un immense répertoire de connaissances complexes organisées et pouvant être mobilisées très rapidement notamment par la perception de certains éléments. La deuxième génération de théories, pour Holyoak, pourrait être illustrée par la théorie ACT d'Anderson (2013) qui est plutôt centrée sur le passage des connaissances déclaratives vers des connaissances procédurales (compilation et automatisation). Dans cette théorie, l'expert est capable de *faire* des choses avec une haute performance et une faible dépense de ressources.

La troisième et dernière génération de théories se caractérise par la différenciation de deux sortes d'expertise : de routine *vs* adaptative. Holyoak (1991, p312) définit les experts *de routine* comme des personnes « *capables de résoudre rapidement et précisément des problèmes de type familier* » mais qui « *ont seulement des capacités modestes dans le traitement de nouveaux types de problèmes* ». Et au contraire, les experts *adaptatifs* sont définis comme « *pouvant être capables d'inventer de nouvelles procédures dérivées de leurs connaissances expertes* ». En d'autres termes, les experts *adaptatifs* auraient une compréhension plus profonde et plus conceptuelle des procédures alors que les experts *de routine* auraient développé des compétences procédurales fortement automatisées (Smith, Ford, & Kozlowski, 1997). Ainsi, dans des situations nouvelles, les experts *adaptatifs* seraient plus performants que les experts *de routine* (van Lehn & Chi, 2012).

Plus spécifiquement encore, l'éducation du comportement oculaire aurait pu prendre la forme de l'enseignement des différents circuits visuels à adopter en fonction des types de cockpits, des manœuvres à exécuter, des conditions météorologiques, etc. La méthode que nous avons choisie se concentre sur un apprentissage plus générique de certains aspects du comportement oculaire des experts-pilotes. Nous faisons l'hypothèse que cet apprentissage devrait développer chez l'élève, une certaine conscience de son comportement oculaire et des erreurs à ne pas commettre. Ainsi cela devrait lui permettre de mieux s'adapter à n'importe quelle situation car les stratégies « conscientisées » qu'il tentera de mettre en place éviteront certains pièges, comme dans le cas qui nous intéresse, de trop focaliser son regard à un endroit en particulier. Pour ces raisons, l'évaluation de l'apport de notre méthode d'éducation pour l'adaptation à des nouvelles situations est particulièrement pertinente.

Parmi les différentes façons d'évaluer cette faculté d'adaptation (voir Carbonell, Stalmeijer, Könings, Segers, et van Merriënboer, 2014), nous avons choisi une méthode, décrite également par van Lehn et Chi (2012) dont le principe est de mesurer l'influence d'un premier apprentissage sur un second apprentissage. Cette

méthode comprend donc deux périodes successives d'apprentissage dont la deuxième fournit une évaluation des connaissances/compétences acquises lors de la première période. Il y a, dans ce cas, principalement deux profils possibles de transfert de ces connaissances/compétences. Le *savings*, qui correspond au cas où le premier apprentissage donne un avantage à un participant pour démarrer l'apprentissage de la seconde tâche (figure 37 – *Savings*), avantage qui se conserve avec la pratique de cette dernière tâche. Le deuxième cas, appelé *acceleration of future learning (AFL)*, se produit lorsque les participants montrent une faculté à apprendre plus rapidement la deuxième tâche (figure 37 – *AFL*). Il est également possible que les participants montrent, à la fois, du *savings* et de l'*acceleration of future learning* (figure 37 – *Both Savings and AFL*). Van Lehn et Chi (2012) modélisaient ces trois cas par une illustration.

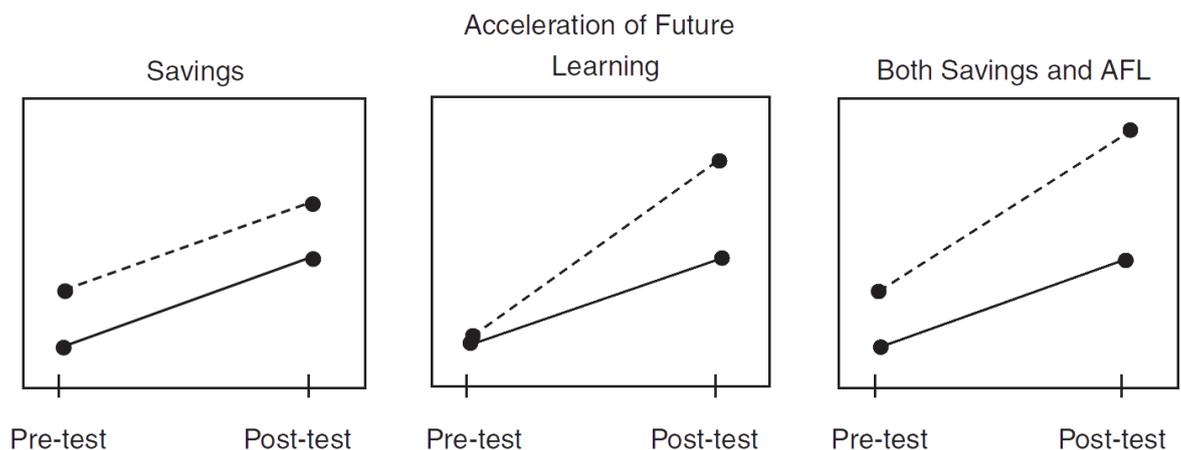


Figure 37 – Graphiques de différents profils de transferts de connaissances/compétences (vanLegen & Chi, 2012). Considérant deux groupes représentés par une ligne discontinue et ligne pleine, ayant reçu un entraînement différent sur une première tâche, ces graphiques schématisent trois cas possibles d'évolution de la performance lors de l'apprentissage d'une seconde tâche (pré-test, post-test). L'évolution de cette performance à cette deuxième tâche permet d'évaluer l'influence de l'entraînement à la première tâche sur la faculté d'adaptation à une seconde tâche.

Nous avons employé cette méthodologie composée de deux périodes d'apprentissage afin d'évaluer si notre méthode d'éducation du comportement oculaire basée sur l'utilisation du PiGaT (i.e., affichage d'une notification à chaque transgression de la « règle des 2 secondes ») permettait bien d'améliorer la faculté d'adaptation à une tâche plus difficile et plus complexe sur le micromonde AFT, notamment en comparaison avec une méthode d'éducation moins guidée où les

participants s'entraînent librement à la tâche sans intervention de notre part (i.e., absence de notification en cas de transgression de la « règle des 2 secondes »). La **première période** d'apprentissage de notre étude avait vocation à reproduire exactement l'entraînement de l'expérimentation 2 décrite au chapitre 4. La **seconde période** d'apprentissage était composée de deux évaluations (pré-test, post-test) séparées par un court entraînement sur une nouvelle configuration du micromonde AFT, cette dernière nécessitant une adaptation importante par rapport la configuration de la première période.

Les paragraphes suivants décrivent l'articulation de ces différents tests au sein du protocole expérimental de cette étude.

5.2 Méthode

5.2.1 Participants

Trente personnels de la Base Aérienne 701 de Salon-de-Provence ont participé à notre étude. L'échantillon comprend 11 femmes et 19 hommes dont l'âge varie de 20 à 37 ans (moyenne = 25, SD = 3.1). Aucun participant n'avait déjà piloté d'aéronef auparavant et tous avaient une vision normale ou corrigée. Les participants ont été répartis aléatoirement dans trois groupes expérimentaux : Les participants du groupe Contrôle (Ctrl) n'ont reçu aucun entraînement lors de la première période, les participants du groupe SimpleTraining (ST) se sont entraînés librement, et les participants du groupe FullTraining (FT) ont bénéficié des notifications.

5.2.2 Matériel

L'expérimentation a été réalisée sur un écran Hyundai W22D de 22 pouces avec une résolution de 1680x1050 pixels. Un *eye tracker* cadencé à 30Hz de la marque EyeTribe® a été utilisé pour recueillir les données oculaires. Les participants étaient assis à 60cm de l'écran, l'EyeTribe était placé entre les deux à 50cm du participant. Un joystick Trustmaster® T16000M a été utilisé comme périphérique d'interaction.

La figure 38 (p. 138) montre le dispositif complet lors de la passation d'un participant.

5.2.3 Utilisation du micromonde AFT

Pour cette expérimentation, nous avons utilisé trois configurations du micromonde AFT qui sont présentées dans le tableau 4 ci-après.

Dénomination	ID2	ID3	ID3+
Indice de difficulté	2	3	> 3
Paramètres AFT	Tâche <i>targeting</i>		
Nombre de distracteurs / zones	200	200	200
Diamètre distracteurs	20px (35' d'arc)	20px	20px
Diamètre cible	26px (44' d'arc)	26px	26px
Distance minimum entre 2 cercles	30px	30px	30px
Temps maximum par scène	9s	9s	9s
Nombre maximal de cibles par zone	1	1	1
Nombre maximal de cibles présentes	1	1	2
	Tâche <i>monitoring</i>		
Vitesse dérive	16px/s	16px/s	16px/s
Vitesse de déplacement	100px/s	32px/s	32px/s
Délai de déclenchement	3,5s	3,5s	3,5s

Tableau 4 - Configurations utilisées pour la réalisation de l'expérimentation. Les cases en beige mettent en avant les paramètres modifiés dans les différentes configurations.

- La première configuration correspond à la configuration « native » de l'AFT utilisée dans l'expérimentation 2 du chapitre 4. D'après les tests que nous avons réalisés sur les indices de difficulté (cf. 3.2.2.3), cette configuration correspond à une difficulté intermédiaire (2/3). Pour cette nouvelle étude, nous ferons référence à cette configuration par l'appellation "**ID2**".
- Pour la deuxième configuration nous avons choisi un indice de difficulté plus élevée parmi les configurations testées (cf. 3.2.2.3). Nous nommerons cette

configuration "ID3" pour les besoins de cette étude. La particularité de cette dernière configuration peut se décrire par le fait que, lors de la dérive d'une flèche, l'action de déplacement de cette flèche pour la ramener vers le centre de sa jauge est ralentie en comparaison de l'ID2.

- La troisième configuration est une version modifiée de l'ID3, que nous nommerons **ID3+**. Dans cette dernière configuration, nous avons modifié la tâche de *targeting* en ajoutant des scènes de recherche dans lesquelles une cible se trouve dans les deux zones de recherche à la fois. Cette modification a pour but d'accroître la valeur écologique de l'AFT par rapport à la situation de pilotage. En effet, dans les autres configurations utilisées jusqu'ici, lorsque la cible était trouvée dans la première zone de recherche explorée par le participant, ce dernier n'avait pas besoin de regarder l'autre zone de recherche. En effet, il ne pouvait pas y avoir deux cibles en même temps : la trouver signifiait avoir la réponse. En ajoutant la possibilité qu'il y ait une cible de chaque côté, cela oblige à scanner toutes les zones de recherche pour chacune des scènes rencontrées, toujours avec la même contrainte temporelle (9 secondes maximum par scène). Cette modification oblige ainsi les participants à réorganiser la répartition de leur attention afin de scruter davantage la tâche de recherche visuelle (*targeting*). Dans le pilotage d'avion, la surveillance du ciel ne s'arrête pas au premier avion repéré dans le ciel. De fait, en ajoutant cette nécessité de vérifier toutes les zones de recherche, nous nous rapprochons encore plus de la situation de pilotage.

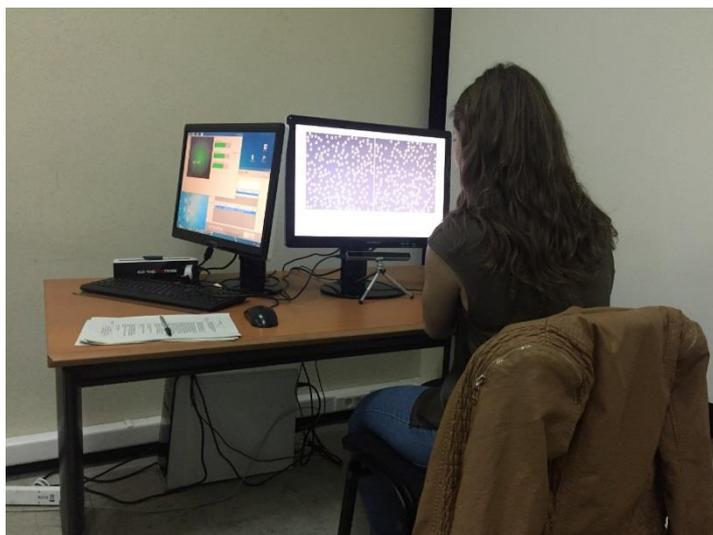


Figure 38 – Photographie d’une participante réalisant cette expérimentation.

5.2.4 Scénario d’apprentissage du PiGaT utilisé

Afin de répliquer les conditions d’éducation du comportement oculaire de l’expérimentation 2 du chapitre 4, nous avons utilisé une nouvelle fois le même scénario d’apprentissage des « 2 secondes ». Pour rappel, ce scénario permet de fournir une notification cachant la tâche de *monitoring* (gestion des flèches) à chaque fois que cette dernière est regardée plus de 2 secondes d’affilée. La figure 39 rappelle le rendu de cette notification sur le micromonde AFT.

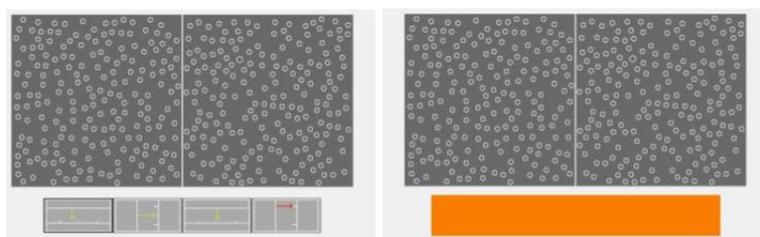


Figure 39 - A gauche, capture d’écran du micromonde AFT. A droite, capture du micromonde AFT lors de l’apparition de la notification produite par le PilotGazeTrainer suite à l’identification d’un temps de regard excédant les 2 secondes d’affilée sur la tâche de *monitoring*.

5.2.5 Tâche

La tâche consistait à détecter des cibles (cercles plus gros) parmi des distracteurs, tout en gérant la dérive de quatre flèches sur une durée de 2 minutes.

5.2.6 Procédure

L'expérimentation s'est déroulée en cinq phases réparties sur deux jours. Le premier jour était composé de la phase de familiarisation, et de la phase d'entraînement (ID2) permettant de reproduire l'entraînement de l'expérimentation précédente (Expé 2 – Chap. 4), qui constituait la première période d'apprentissage.

Le deuxième jour était composé (i) d'une première phase de contrôle de l'apprentissage (ID2), puis (ii) d'une seconde période d'apprentissage (ID3) permettant d'évaluer la faculté d'adaptation et enfin (iii) d'une dernière évaluation sur la configuration ID3+ de l'AFT, constituant une situation plus proche de la situation de pilotage. L'expérimentation était clôturée par un entretien semi-directif visant à évaluer la conscience qu'avaient les participants de leur comportement oculaire. Pour rappel, ces entretiens n'ont pas encore été exploités. La figure 40 récapitule l'ensemble de cette procédure et les paragraphes suivants décrivent plus précisément chacune des phases de cette expérimentation.

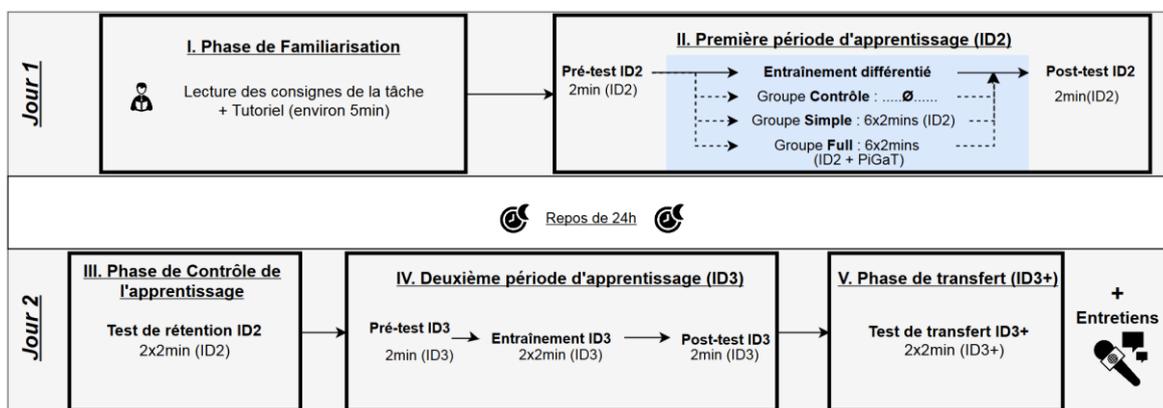


Figure 40 - Schéma du protocole expérimental en 5 phases réparties sur 2 jours. Le premier jour comprenait une phase de familiarisation et une première période d'entraînement dans laquelle se trouve la manipulation expérimentale symbolisée par l'encadré bleu. Le second jour était composé (i) d'une phase de vérification de l'apprentissage du premier jour (test de rétention) puis (ii) d'une seconde période d'apprentissage sur une nouvelle configuration du micromonde AFT (ID3), (iii) d'une évaluation sur une tâche écologiquement plus proche du pilotage (configuration ID3+) et enfin (iv) d'un entretien semi-directif.

5.2.6.1 Jour 1, familiarisation

Cette phase avait pour objectif de permettre aux participants de découvrir le matériel et de tester les différentes modalités d'interaction du joystick afin que le principe de l'AbstractFlyingTask soit compris. Pour cela il leur était demandé de lire

un texte présentant la tâche puis de s'exercer environ cinq minutes sur un tutoriel (une version simplifiée de l'AFT). Dans cette version, les cibles étaient grossièrement plus grandes que les distracteurs, il n'y avait que 5 distracteurs par zones et seulement 2 jauges étaient présentes. La figure 41 montre un participant en train de réaliser ce tutoriel. Une fois ce tutoriel terminé, le dispositif d'*eye tracking* était initialisé et calibré.

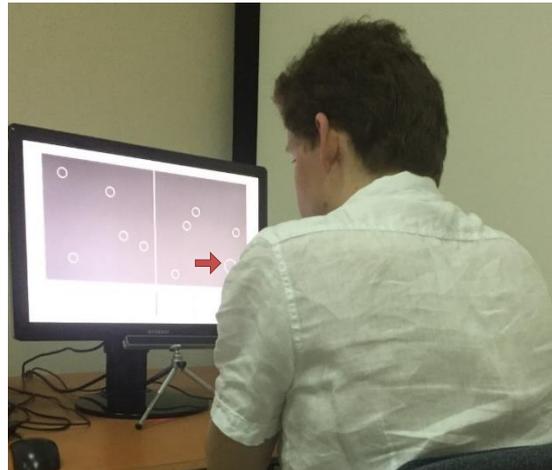


Figure 41 - Photographie d'un participant en train de réaliser le tutoriel du micromonde AFT. Une flèche rouge a été ajoutée à la photo et indique la cible dans la scène.

5.2.6.2 Jour 1, première période d'apprentissage (ID2)

Une fois la phase de familiarisation clôturée, les participants réalisaient une première période d'apprentissage. Durant cette phase, nous avons reproduit l'essentiel du protocole expérimental de l'expérimentation 2 du chapitre 4. Seule la configuration ID2 du micromonde AFT a été utilisée.

Les participants ont réalisé un premier test (*pré-test ID2*) afin d'évaluer leur performance initiale sur cette configuration, puis une période d'entraînement différenciée entre les groupes.

Lors de la période d'entraînement différenciée, le groupe FullTraining réalisait 6 sessions de deux minutes d'entraînement durant lesquelles des notifications étaient produites par le PilotGazeTrainer sur la base du scénario des « 2 secondes » (figure 39). Le groupe SimpleTraining réalisait 6 sessions d'entraînement librement, sans aucune contrainte ou indication. Le groupe Contrôle ne réalisait aucune

session d'entraînement. Pour séparer les deux sessions d'évaluation des participants de ce groupe, une pause de 6 minutes était respectée. Cette période d'entraînement constitue ainsi la manipulation expérimentale de cette expérimentation. Le PilotGazeTrainer n'a pas été utilisé en dehors de cet entraînement, la suite de l'expérimentation s'est donc déroulée sans production de notifications pour les trois groupes expérimentaux.

Pour finir ce premier jour, les participants effectuaient une évaluation finale (*post-test ID2*) pour évaluer leur performance en fin de séance, sans notification.

5.2.6.3 Jour 2, Contrôle – Evaluation de la faculté d'adaptation - transfert

Le deuxième jour (24h plus tard) était identique pour les trois groupes expérimentaux. La séance était séparée en trois phases distinctes. Un test de rétention (*rétention ID2*) était réalisé afin d'évaluer l'apprentissage lié à l'entraînement du jour précédent. Ce test était composé de 2 sessions de 2 minutes sur la configuration ID2 de l'AFT et permettait de contrôler la reproduction de l'éducation obtenue lors de l'expérimentation précédente (Expé 2 – Chap. 4).

A la suite de cette phase de contrôle, la deuxième période d'apprentissage pouvait commencer. Cette phase, qui avait pour but d'évaluer la capacité d'adaptation, commençait par un premier test sur la configuration ID3 de l'AFT (*pré-test ID3*). Ce test était suivi de deux sessions d'entraînement et d'une nouvelle évaluation (*post-test ID3*) sur cette même configuration. Toutes les sessions étaient de deux minutes.

Un test de transfert était ensuite réalisé sur la configuration ID3+ de l'AFT. Ce test était composé de deux sessions successives de deux minutes. Enfin, la participation se terminait avec un entretien semi-directif dont les questions portaient sur le ressenti et la façon de réaliser la tâche des participants.

5.3 Résultats

Les analyses conduites ont été réparties de sorte à répondre aux objectifs initiaux de cette étude, à savoir, (1) la vérification de la reproduction de la modification comportementale observée dans l'expérimentation précédente (Expé 2 – Chap. 4), (2) la vérification de l'apport de bénéfices de notre méthode d'éducation basé sur PiGaT et enfin (3) l'évaluation de la valeur écologique des configurations ID3 et ID3+ du micromonde AFT.

Pour les deux premiers objectifs, nous avons concentré nos analyses sur deux mesures principales que sont la répartition du regard sur la tâche de *targeting* et la performance globale au micromonde AFT (*i.e.* score général donné sur 100). Nous avons fait le choix d'étudier la performance au micromonde à partir d'une mesure prenant en compte la performance conjointe aux deux tâches. Nous avons préféré cette mesure macroscopique à l'étude des performances distinctes de chaque tâche, car cela permet d'évaluer plus clairement l'objectif qui était fixé aux participants, à savoir, de réaliser simultanément les deux sous-tâches (*i.e.*, *Targeting* et *Monitoring*) d'importance équivalente.

5.3.1 Vérification de la reproduction de la modification comportementale

Pour pouvoir faire le parallèle avec l'expérimentation précédente, nous nous sommes placés au plus près des conditions d'analyse de cette dernière. Les analyses de cette section ont concerné uniquement les tests réalisés sur la configuration ID2 du micromonde AFT pour les groupes qui se sont entraînés. Nous avons conduit des ANOVA avec le facteur "Groupe" (SimpleTraining ; FullTraining) comme facteur inter-groupe et le facteur "Test" (pré-testID2 ; post-testID2 ; rétentionID2) comme facteur intra-groupe avec des mesures répétées sur le dernier facteur.

Proportion du temps passé à regarder la tâche de targeting (%) : Cette mesure, illustrée par la figure 42, correspond à la proportion du temps de fixation (somme

de la durée de toutes les fixations) passé à regarder la tâche de *targeting*. Les résultats de l'ANOVA montrent un effet simple significatif du facteur "Groupe", $F(1,18) = 11.7629$; $MSE = 2291.7$; $p = .002988$, et du facteur "Test", $F(2, 36) = 12.4301$; $MSE = 608.2$; $p < .001$, ainsi qu'un effet d'interaction Groupe x Test significatif $F(2,36) = 3.9347$; $MSE = 192.5$; $p = .028479$.

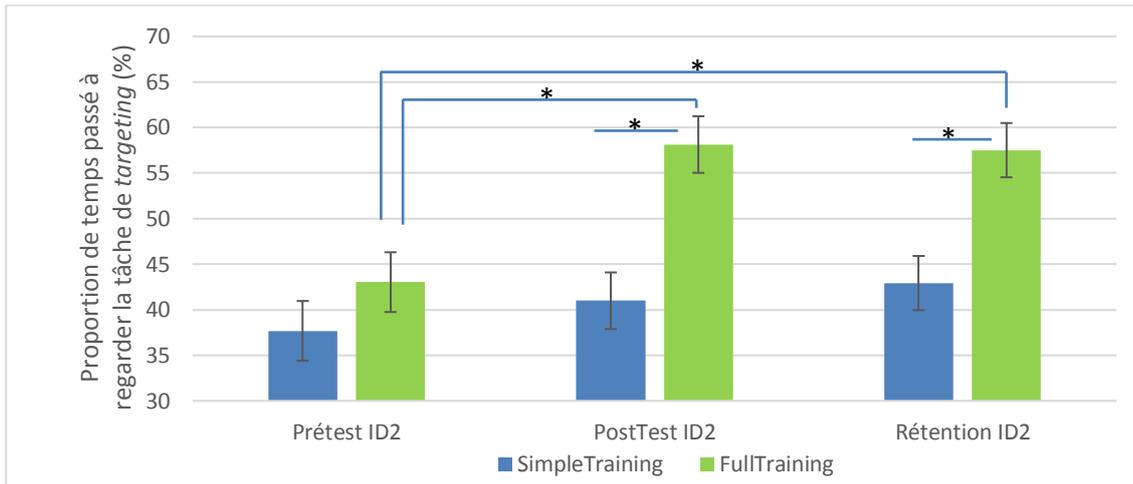


Figure 42 – Graphique présentant le pourcentage de temps passé à regarder la tâche de *targeting* (recherche visuelle) lors des trois tests sur la configuration ID2 du micromonde AFT (i.e. pré-test ID2, post-test ID2, test de rétention ID2) pour les groupes SimpleTraining (bleu) et Fulltraining (vert). Les barres d'erreur montrent les erreurs standards.

Des tests *a posteriori* (Newman-Keuls) montrent tout d'abord que les deux groupes ne sont pas significativement différents lors du pré-test, $p > .1$, (SimpleTraining : moyenne = 37.6824, SE = 3.279 ; FullTraining : moyenne = 43.03108, SE = 3.08). Puis, les résultats ne montrent pas de différences significatives pour le groupe SimpleTraining, ni entre le pré-test et le post-test (moyenne = 40.988, SE = 3.106), $p > .1$, ni entre le post-test et le test de rétention (moyenne = 42.92622, SE = 2.976), $p > .1$, ni entre le pré-test et le test de rétention, $p > .1$.

A l'inverse, concernant le groupe FullTraining, la proportion de temps passé à regarder la tâche de *targeting* lors du post-test (moyenne = 58.13094, SE = 3,106873) est significativement supérieure à celle lors du pré-test, $p < .001$. De plus, la proportion de temps passé à regarder cette tâche lors du test de rétention (moyenne = 57.51666, SE = 2.976833) est significativement supérieure à celle lors du

pré-test, $p < .001$, mais n'est pas significativement différente de celle lors du post-test, $p > .1$.

Pour finir, ces résultats montrent que le groupe FullTraining regarde significativement plus la tâche de *targeting* comparé au groupe SimpleTraining en post-test ($p = .003796$) et en test de rétention ($p = .00609$). Sur cette mesure, les résultats répliquent parfaitement ceux de l'expérimentation précédente décrite dans le chapitre 4.

Performance aux deux sous-tâches simultanées (performance globale)

Les résultats de l'ANOVA à mesures répétées sur la performance globale à l'AFT montrent un effet simple significatif du facteur "Test", $F(2,36) = 195$; $MSE = 7220.3$; $p < .001$, ne montrent pas d'effet significatif du facteur "Groupe", $F(1,18) = 0.308$; $MSE = 51.7$; $p > .1$, et pas effet d'interaction Groupe x Test, $F(2,36) = 0.785$; $MSE = 29.1$; $p > .1$.

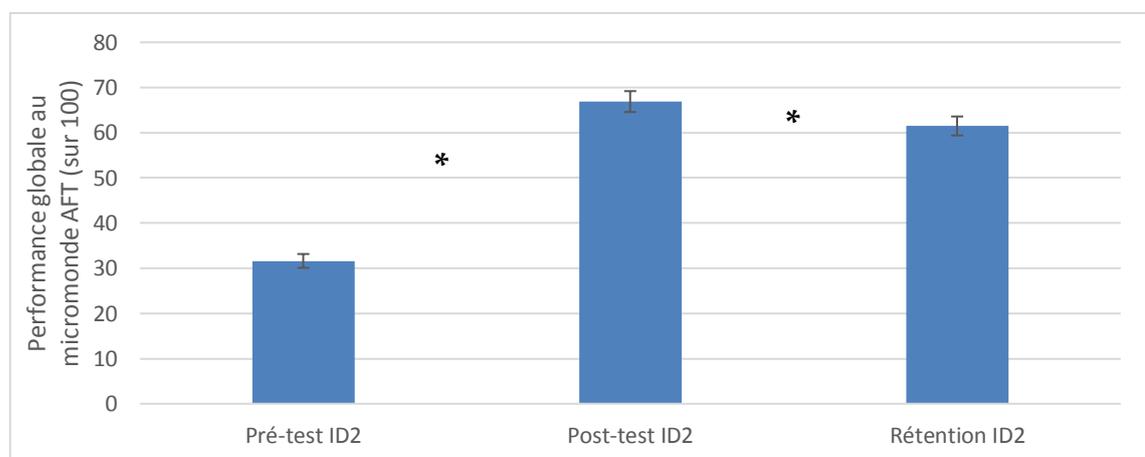


Figure 43 – Graphique présentant la performance globale à l'AFT lors des trois premiers tests sur la configuration ID2 du micromonde AFT (*i.e.* pré-test ID2, post-test ID2, test de rétention ID2) pour les groupes SimpleTraining et Fulltraining regroupés. Les barres d'erreur montrent les erreurs standards.

Des tests *a posteriori* (Newman-Keuls) réalisés sur le facteur simple "Test" montrent que les deux groupes obtiennent une performance lors du post-test (moyenne = 66.88762, SE = 2.315289) significativement supérieure à celle lors du pré-test (moyenne = 31.61422, SE = 1.534249), $p < .001$. De plus, la performance obtenue lors du test de rétention (moyenne = 61.49351, SE = 2.094303) est significativement

supérieure à celle lors du pré-test, $p < .001$, et est significativement inférieure à celle lors du post-test, $p = .008225$.

Les résultats corroborent ceux de l'expérimentation précédente. En effet, il n'est pas possible de différencier les deux groupes sur la configuration ID2 de l'AFT en termes de performance à la tâche et les deux groupes ont progressé avec l'entraînement entre le pré-test et le post-test. Une faible diminution de la performance est cependant à noter lors du test de rétention ID2.

5.3.2 Evaluation des bénéfices de l'éducation du comportement oculaire

L'analyse principale de cette expérimentation a été réalisée sur la mesure de la performance globale à l'AFT pour les trois groupes expérimentaux lors des tests sur les configurations ID3 et ID3+ de ce micromonde. Nous avons conduit pour cela une ANOVA avec le facteur "Groupe" (Contrôle ; SimpleTraining ; FullTraining) comme facteur inter-groupe et le facteur "Test" (pré-testID3 ; post-TestID3 ; TransfertID3+) comme facteur intra-groupe avec des mesures répétées sur le dernier facteur.

Afin de mieux comprendre les résultats de cette analyse centrale, nous avons souhaité différencier le comportement oculaire des deux groupes qui se sont entraînés le premier jour (*i.e.* SimpleTraining vs FullTraining) sur ces trois mêmes tests (*i.e.* pré-testID3 ; post-TestID3 ; TransfertID3+). Nous avons ainsi retiré le groupe Contrôle afin de conduire une seconde ANOVA sur la proportion de temps passé à regarder la tâche de *targeting*.

Performance aux deux sous-tâches simultanées (performance globale) :

Les résultats de l'ANOVA à mesures répétées sur la performance globale à l'AFT montrent un effet simple significatif du facteur "Groupe", $F(2,27) = 6.1667$; $MSE = 1916.1$; $p = .006225$, du facteur "Test", $F(2,54) = 15.1026$; $MSE = 543.3$; $p < .001$, ainsi qu'un effet d'interaction Groupe x Test, $F(4,54) = 2.8047$; $MSE = 100.9$;

$p = .034529$. La figure 44 illustre l'évolution de cette performance globale pour les trois groupes expérimentaux.

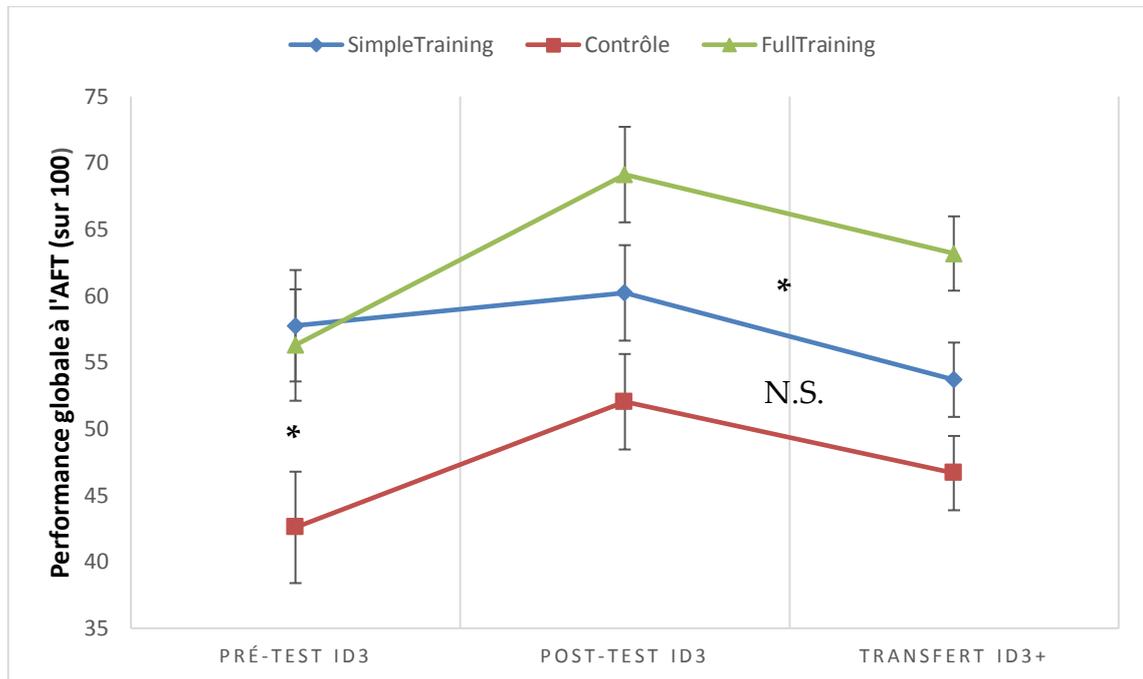


Figure 44 – Graphique présentant la performance globale à l'AFT pour les groupes contrôle (rouge), SimpleTraining (bleu) et FullTraining (vert) obtenu durant lors du pré-test ID3, post-test ID3 et test de transfert ID3+. La performance globale est une mesure, donnée sur 100, rendant compte de la performance aux deux tâches simultanément. Les barres d'erreur présentent les erreurs standards.

Les résultats de comparaisons planifiées montrent que les groupes ayant reçu un entraînement le premier jour (*i.e.* SimpleTraining + FullTraining) ont une performance globale à l'AFT significativement supérieure à celle du groupe Contrôle ($F(1,27) = 7.918293$; $MSE = 1390.324$; $p = .009019$) lors du pré-test ID3.

Concernant le post-test ID3 et le test de transfert ID3+, le groupe FullTraining a obtenu une performance globale significativement supérieure à celle du groupe SimpleTraining ($F(1,27) = 4.600033$; $MSE = 845.9034$; $p = .041127$) qui elle, n'est pas significativement différente de celle du groupe Contrôle ($F(1,27) = 3.144959$; $MSE = 578.3288$; $p = .08744$). Le groupe FullTraining, qui a reçu l'éducation du comportement oculaire lors de la première période d'apprentissage, montre ainsi sa supériorité face aux deux autres groupes dans l'apprentissage de la configuration plus difficile (ID3) de l'AFT et dans la performance à une configuration plus écologique (ID3+).

Nous avons donc retiré le groupe Contrôle le temps d'une analyse complémentaire afin de comparer le comportement oculaire des groupes qui se sont entraînés le premier jour. Les résultats de l'ANOVA réalisée sur la proportion du temps passé à regarder la tâche de *targeting* montrent un effet simple significatif du facteur "Groupe", $F(1,18) = 5.1208$; $MSE = 1605.1$; $p > .036241$, du facteur "Test", $F(2, 36) = 24.1827$; $MSE = 876$; $p < .001$, mais ne montrent pas d'effet d'interaction Groupe x Test, $F(2, 36) = 1.9182$; $MSE = 69.5$; $p > .1$.

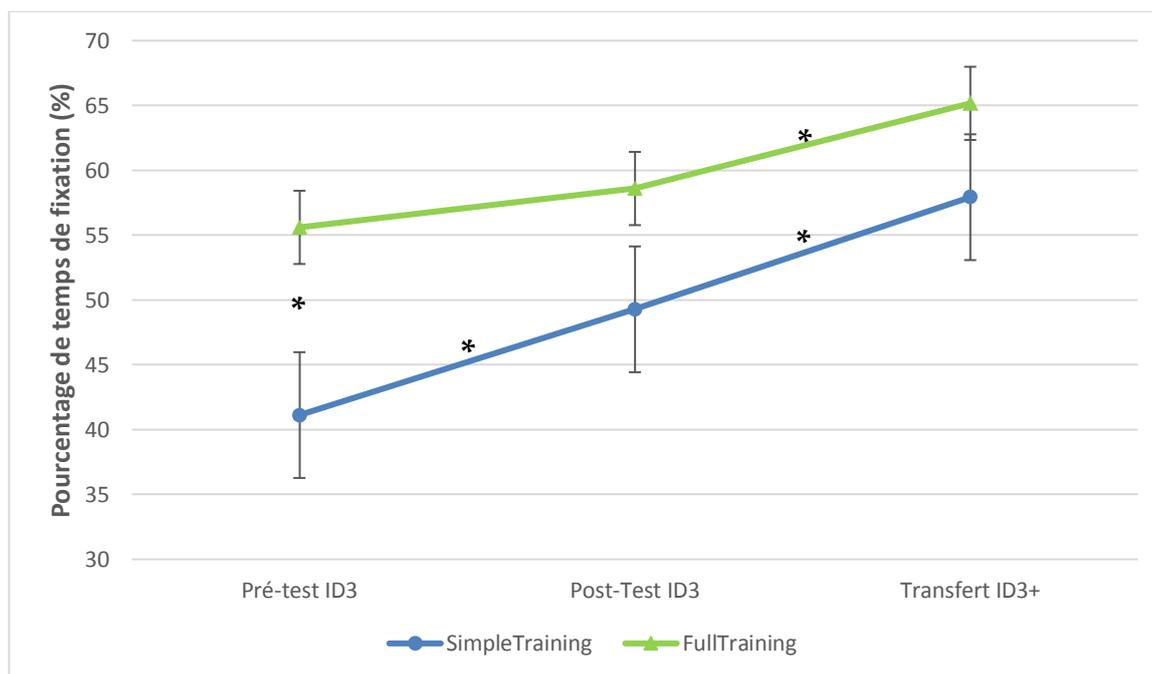


Figure 45 - Graphique présentant le pourcentage de temps passé à regarder la tâche de *targeting* (recherche visuelle) lors des tests sur les nouvelles configurations du micromonde AFT (*i.e.* pré-test ID3, post-test ID3, transfert ID3+) pour les groupes SimpleTraining (bleu) et Fulltraining (vert). Les barres d'erreur montrent les erreurs standards.

Des tests *a posteriori* (Newman-Keuls) montrent que lors du pré-test ID3, le groupe FullTraining regarde significativement davantage la tâche de *targeting* que le groupe SimpleTraining ($p = .021866$). Après l'entraînement sur cette configuration (*i.e.* en post-test ID3), la proportion du temps passé à regarder la tâche de *targeting* n'est significativement pas différente pour le groupe FullTraining ($p > .1$) alors que le groupe SimpleTraining regarde significativement plus la tâche de *targeting* qu'en pré-test ($p = .007725$). Les deux groupes ne sont pas significativement différents sur cette mesure lors du post-test ID3 et lors du test de transfert sur l'ID3+.

Ces résultats montrent que les participants du groupe SimpleTraining ont modifié leur comportement oculaire durant l'entraînement à la configuration ID3 du micromonde AFT contrairement au groupe FullTraining qui semble avoir acquis et conservé un comportement oculaire efficace. Ces résultats montrent également que les deux groupes ont modifié leur comportement oculaire durant la réalisation du test de transfert sur la configuration ID3+.

5.3.3 Evaluation de la valeur écologique des configurations ID3 et ID3+ du micromonde AFT

Afin d'évaluer la valeur écologique des nouvelles configurations du micromonde AFT, il était nécessaire d'analyser l'évolution du comportement oculaire avec la pratique du micromonde sans intervention. Nous avons pour cela réalisé des ANOVA uniquement pour le groupe SimpleTraining avec un simple facteur "Test" (pré-testID3 ; post-TestID3 ; TransfertID3+).

La fréquence de fixation (fix/min) : Les résultats de l'ANOVA sur la fréquence de fixation montrent un effet simple significatif du facteur "Test", $F(2,27) = 3.4914$, $MSE = 443.9$, $p = .044814$. La figure 46 montre l'évolution de cette fréquence de fixation pour le groupe SimpleTraining lors du pré-test ID3, du post-test ID3 et du test de transfert ID3+.



Figure 46 – Graphique présentant l'évolution de la fréquence de fixation (fixations / minute) au cours des différents tests sur les configurations ID3 et ID3+ de l'AFT pour le groupe SimpleTraining. Les barres d'erreur présentent les erreurs standards.

Des tests *a posteriori* (Newman-Keuls) montrent que la fréquence de fixation (fix/min) lors du post-test ID3 (moyenne = 124.25, SE = 4.377499) n'est pas significativement différente à celle du pré-test ID3 (moyenne = 123.15, SE = 3.733519), $p > .1$, et que la fréquence de fixation lors du test de transfert ID3+ (moyenne = 135.2, SE = 2.244376) est tendanciellement supérieure à celle du pré-test, $p = .060606$, et est significativement supérieure à celle du post-test, $p = .038962$.

Durée moyenne des fixations (ms) : Les résultats de l'ANOVA sur la durée moyenne des fixations montrent un effet simple significatif du facteur "Test", $F(2,27) = 4.490$, $MSE = 3840$, $p = .020725$. La figure 47 montre l'évolution de cette durée des fixations pour le groupe SimpleTraining lors du pré-test ID3, du post-test ID3 et du test de transfert ID3+.

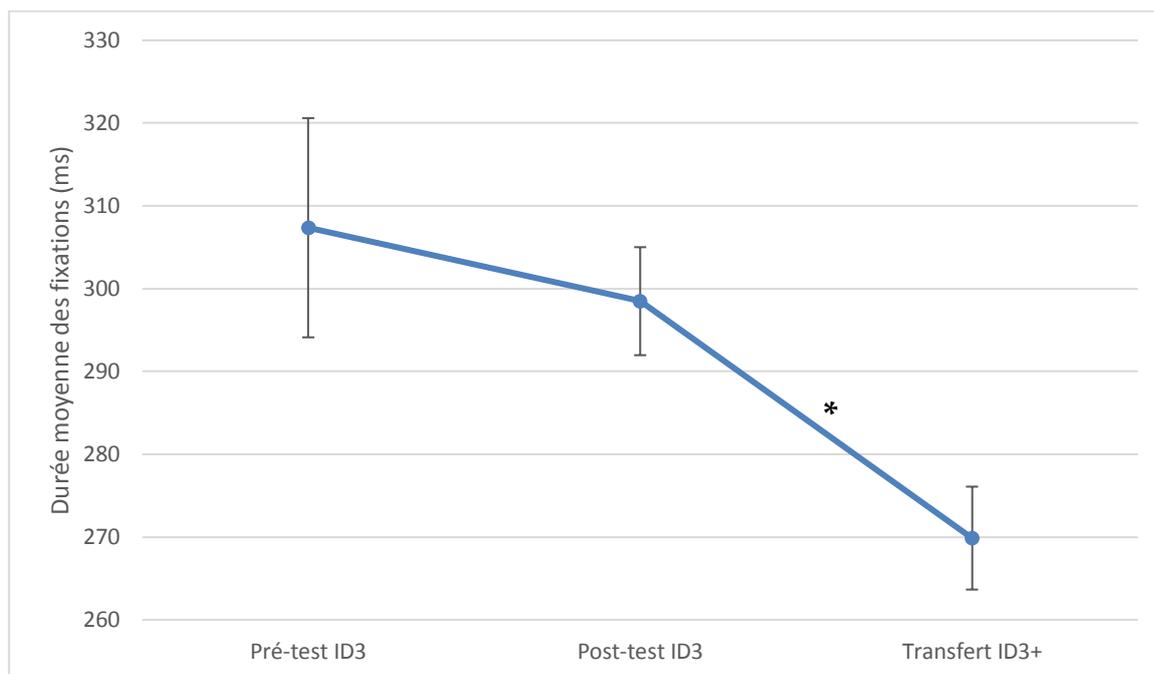


Figure 47 - Graphique présentant l'évolution de la durée moyenne des fixations (millisecondes) au cours des différents tests sur les configurations ID3 et ID3+ de l'AFT pour le groupe SimpleTraining. Les barres d'erreur présentent les erreurs standards.

Des tests *a posteriori* (Newman-Keuls) montrent que la durée moyenne des fixations lors du post-test ID3 (moyenne = 298.4897, SE = 6.52363) n'est pas significativement différente à celle lors du pré-test ID3 (moyenne = 307.3636, SE = 13.24070), $p > .1$. En revanche, la durée moyenne des fixations lors du test de transfert ID3+

(moyenne = 269.8693, SE =6.21673) est significativement inférieure à celle du pré-test, $p = .021056$, et du post-test, $p = .037576$.

L'augmentation du nombre de fixations par minute et la diminution de la durée moyenne des fixations sur la configuration ID3+ l'AFT est cohérente avec le postulat que cette dernière est plus écologique du pilotage. En effet, par rapport aux comportements oculaires observés précédemment sur la configuration ID2, ces caractéristiques du comportement oculaire se rapprochent encore davantage de celles observées dans la situation réelle ou simulée de pilotage (cf. 2.1.1).

5.4 Discussion

Cette deuxième expérimentation réalisée avec le PilotGazeTrainer et l'AbstractFlyingTask était composée de deux parties dont la première était une reprise du protocole de l'expérimentation précédente (cf. Chapitre 4.2). Concernant cette première partie, les principaux résultats de l'expérimentation précédente ont bien été répliqués. Nous avons en effet observé, une nouvelle fois, que le comportement naturel des participants était de regarder environ 40% du temps la tâche de *targeting*. Sans intervention de notre part, les participants qui se sont entraînés librement (groupe SimpleTraining) ont conservé ce comportement comme le montrent les mesures en post-test et test de rétention ID2. L'environnement d'apprentissage proposé au groupe FullTraining grâce au PiGaT a permis de modifier durablement le comportement oculaire des participants de ce groupe pour atteindre environ 60% du temps de fixation en fin d'entraînement. Enfin, la configuration ID2 de l'AFT n'a pas permis de différencier ces deux groupes sur leur performance globale au micromonde. Ces résultats peuvent confirmer que **les notifications délivrées par le PiGaT permettent de modifier durablement le comportement oculaire durant la pratique d'une situation dynamique et complexe.**

Le deuxième résultat fort de cette expérimentation concerne la seconde période d'apprentissage sur la configuration ID3 du micromonde AFT. Celle-ci avait pour but d'évaluer l'influence de la première période d'apprentissage sur la faculté d'adaptation à une seconde configuration plus difficile. Sans surprise, les groupes dont les participants ont reçu un entraînement le premier jour (*i.e.*, SimpleTraining et FullTraining) ont été plus performants que le groupe Contrôle lors du pré-test ID3 de la seconde période d'apprentissage. Néanmoins, alors que cette deuxième période d'entraînement était identique pour les trois groupes expérimentaux (*i.e.*, entraînement libre), tous n'affichent pas une évolution similaire. La figure 48 illustre les différentes évolutions de la performance globale à l'AFT lors du pré-test et post-test de la configuration ID3.

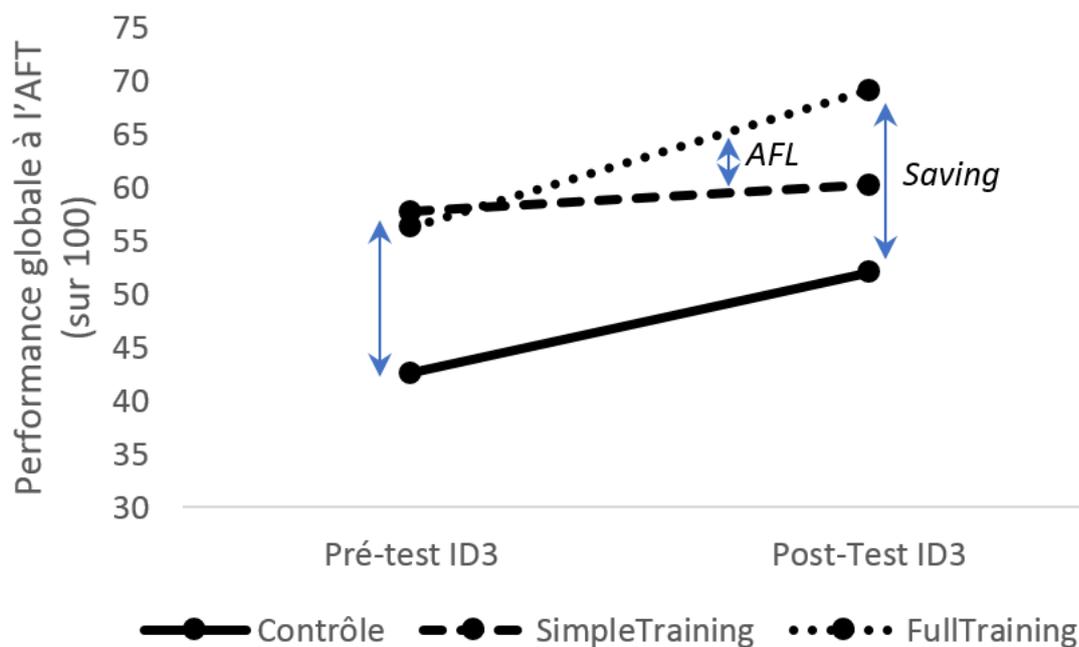


Figure 48 – Graphique présentant la performance globale à l'AFT des trois groupes expérimentaux lors de la seconde période d'apprentissage (pré-test et post-Test). Toute cette période a été faite sur la configuration ID3 de l'AFT et entre ces deux évaluations, deux sessions d'entraînement libre de 2 minutes étaient réalisées. Ce graphique montre le profil du transfert de connaissances/compétences acquises lors de la première période d'apprentissage sur l'apprentissage de cette nouvelle tâche. Le profil des participants du groupe FullTraining correspond à de l'Acceleration of Future Learning comparé au groupe SimpleTraining et à du saving comparé au groupe Contrôle (vanLegen & Chi, 2012).

Conformément à ce que la théorie de l'expertise adaptative suggère (vanLegen & Chi, 2012), le groupe FullTraining affiche une vitesse de progression plus importante que le groupe SimpleTraining correspondant ici à de l'« Acceleration of Future Learning (AFL) ». L'éducation du comportement oculaire reçue lors de la

première période d'entraînement permettrait aux participants du groupe FullTraining de s'adapter plus rapidement à la nouvelle configuration du micromonde, ce que n'a pas permis l'entraînement libre (SimpleTraining). De plus, cet entraînement (libre) reçu par les participants du groupe SimpleTraining ne leur a pas non plus permis, en post-test ID3, de conserver leur avantage, obtenu en pré-test ID3, sur les participants du groupe Contrôle. Par conséquent, seul le groupe FullTraining présente également du *saving* par rapport au groupe Contrôle.

Une des explications possibles de ces résultats est fournie par l'analyse du comportement oculaire des groupes SimpleTraining et FullTraining lors des tests sur la configuration ID3 de l'AFT. En effet, alors que le groupe FullTraining a conservé une répartition du regard acquise en fin d'entraînement ID2 et privilégiant la tâche de *targeting*, le groupe SimpleTraining montre une augmentation significative de son temps de regard sur cette même tâche entre le pré-test et le post-test (ID3). Cette modification comportementale tardive montre que la stratégie adoptée jusque-là par les participants du groupe SimpleTraining ne pouvait plus convenir. En effet, avec le ralentissement de la vitesse de déplacement des flèches dans la configuration ID3, il était encore plus qu'avant nécessaire de ne pas focaliser sur les flèches et de parvenir à gérer simultanément les deux tâches. Il semblerait que l'entraînement du premier jour a constitué, pour ce groupe, un fardeau dans l'adaptation à une nouvelle configuration du micromonde AFT. Cela sous-entend que la stratégie naturellement adoptée par les participants du groupe SimpleTraining (regarder seulement 40% du temps la tâche de *targeting*) serait bien une mauvaise habitude, qui, une fois installée, influencerait négativement la capacité à s'adapter. En revanche, le feedback donné aux participants du groupe FullTraining tout au long de la première période d'apprentissage a parfaitement permis de corriger cette mauvaise habitude et leur a permis ensuite de pouvoir mieux s'adapter à une nouvelle configuration.

Les résultats des évaluations concernant la configuration ID3+ montrent que sur cette configuration, plus difficile et plus complexe, le groupe FullTraining est à

nouveau supérieur aux deux autres groupes. L'éducation du comportement oculaire dont les participants du groupe FullTraining ont bénéficié s'est donc avérée être un atout capital pour la pratique de cette version nouvelle version (ID3+) du micromonde AFT. Toutefois, il est également à noter que cette configuration a néanmoins permis au groupe SimpleTraining de modifier certaines caractéristiques du comportement oculaire. Ils réalisent en effet, davantage de fixations et des fixations plus courtes, ce qui corrobore les résultats de la littérature sur le comportement oculaire dans le pilotage (cf. 2.1.1). La présence de plusieurs cibles introduirait une forme d'incertitude qui aurait pour conséquence la nécessité d'organiser différemment sa manière de surveiller entièrement les zones de recherche. Ces résultats permettent de penser que cette configuration ID3+ possède, vis-à-vis de la situation de pilotage, une valeur écologique plus importante. Il serait intéressant, à l'avenir, de travailler davantage avec des configurations intégrant cette particularité « + » de la tâche (i.e., multi-cibles). Cela pourrait, à terme, permettre d'inscrire le micromonde AFT dans le registre des outils pertinents autorisant l'étude des tâches dynamiques et complexes, telles que le pilotage, à l'instar d'autres micromondes comme SpaceFortress ou NASA-MATB.

5.5 Conclusion

Cette expérimentation démontre que l'éducation du comportement oculaire que nous proposons (via le PiGaT) apporte une plus-value. En effet, dans la situation dynamique et complexe du micromonde AFT, sans intervention extérieure, les participants adoptent naturellement une stratégie identifiée comme étant une mauvaise habitude. Cette dernière consiste à trop regarder la tâche de *monitoring* au détriment de celle de *targeting*. Lors du passage sur une configuration plus difficile (ID3) ou plus complexe (ID3+), l'acquisition de cette mauvaise habitude rend plus difficile l'adaptation des participants. À l'inverse, les personnes qui ont bénéficié de l'éducation du comportement oculaire grâce au PiGaT, n'ont pas adopté cette mauvaise habitude et ont révélé leur supériorité quant à leur capacité à transférer leurs acquis sur de nouvelles configurations. Ces résultats démontrent que la

méthode d'éducation que nous proposons permet de rendre plus optimal, le temps de pratique d'une tâche dynamique et complexe. Ainsi, avec le même temps d'entraînement, les personnes dont le comportement oculaire serait éduqué de cette manière, le plus tôt possible, s'adaptent mieux lorsque la difficulté ou la complexité augmente.



Chapitre 6

Comportement oculaire et performance à différents stades de la formation des pilotes militaires

6.1 Introduction

L'expérimentation présentée dans ce chapitre a pour but principal de faire l'état des lieux des comportements oculaires et des performances des pilotes de l'Armée de l'air (*e.g.*, figures 49 & 51) à différents stades de la formation de pilotage. Avec cette expérimentation, nous avons souhaité entamer la constitution d'une banque de connaissances décrivant le plus précisément possible (valeurs quantitatives) les caractéristiques générales des pilotes militaires français à différents stades d'expertise. Cela pourrait notamment permettre d'établir des objectifs clairs et chiffrés pour l'éducation du comportement oculaire des futurs pilotes en formation. A partir de ces objectifs chiffrés, il deviendrait alors possible de concevoir des scénarios d'apprentissage individualisés avec le PiGaT pour éduquer le

comportement oculaire des novices au plus près des prérequis attendus tout en prenant en compte l'état de leur comportement naturel.



Figure 49 – Photographie d'un cadet-pilote (fin de la phase 1 de la formation de pilotage de l'Armée de l'air) en train de participer à cette expérimentation, aux commandes du simulateur de Cirrus SR20 et équipé de l'eye tracker Perteck®.

Trois populations différentes de pilotes sont présentes sur la BA 701 de Salon-de-Provence : (1) des novices n'ayant pas encore commencé la formation de pilotage de l'armée de l'air, (2) des cadets totalisant environ 40 heures de vol et (3) des pilotes de chasse expérimentés (experts) revenus pour être instructeurs-pilotes. L'expérimentation décrite dans ce chapitre a ainsi consisté à observer le comportement oculaire et la performance de ces pilotes durant la réalisation de manœuvres standards au cours d'un vol sur simulateur. Durant ce vol, les manœuvres sélectionnées étaient des virages (droite ou gauche) à 30° d'inclinaison, des montées à vitesse optimale (VOM) et des descentes rapides (OPS). Ces trois types de manœuvres sont enseignés durant la formation à Salon-de-Provence et constituent des difficultés différentes.

Ce chapitre présente uniquement les analyses réalisées sur les manœuvres de virage, les analyses des montées et descentes n'ayant pas encore été totalement finalisées. Les virages sont les manœuvres les moins difficiles et sont généralement

travaillées très tôt dans la formation de pilotage. C'est dans le cadre de l'analyse spécifique de ces manœuvres que nous avons rencontré une difficulté concernant la finesse d'analyse des données. En effet, les analyses macroscopiques de la performance généralement réalisées dans la littérature (*i.e.* erreur d'altitude ou de vitesse sur la totalité d'une manœuvre) n'ont pas permis de différencier correctement les trois populations de pilotes. Il a donc fallu changer de niveau d'analyse pour essayer de capturer plus finement les éléments sur lesquels ces populations pourraient se différencier. Nous avons ainsi découpé les virages en quatre sous-phases à l'aide d'un algorithme décrit en annexe (annexe 2). Ceci nous a permis de mener nos analyses du comportement oculaire sur des périodes clairement bornées et d'obtenir de nouvelles mesures de performances d'un niveau de granularité plus fin.

Ce chapitre détaille en préambule, cette découpe des virages en quatre sous-phases. Puis l'expérimentation réalisée sera présentée dans sa globalité avant de décrire et de discuter les résultats des analyses pour les manœuvres de virages.

6.2 La découpe en phases des virages

Dans le cas d'un changement de cap, le pilote doit effectuer un virage afin de modifier la direction de son avion. Pour cela, le pilote doit (1) incliner l'avion afin que ce dernier se mette à virer, (2) attendre que la direction de l'avion approche le cap souhaité, puis (3) remette l'avion à l'horizontale pour arrêter de virer et enfin (4) corriger les éventuelles erreurs commises durant la manœuvre. En résumé, toute manœuvre peut être décrite par les phases suivantes : (1) la mise en manœuvre, (2) le corps de la manœuvre, (3) la sortie de manœuvre et (4) la stabilisation et correction des erreurs.

Dans la première phase, *i.e.* la mise en virage, la temporalité est plutôt courte car le délai entre l'action du pilote sur les commandes de vol et le changement d'état de l'avion se fait relativement rapidement. Dans cette phase le pilote doit contrôler

finement les conséquences de ses actions afin que cela coïncide avec l'attitude dans laquelle il souhaite mettre l'avion, par exemple l'incliner à 30° afin de faire un virage modérément rapide.

Puis dans la deuxième phase le pilote doit se concentrer sur le maintien de son avion dans l'attitude choisie tout en vérifiant que les autres paramètres ne varient pas (*e.g.* vitesse, altitude, etc.). Si un de ces paramètres venait à changer, par exemple l'altitude, le pilote réaliserait alors des actions correctives. Dans cette phase, le pilote est censé uniquement conserver la dynamique de la situation intacte et attendre que cette dernière place l'avion dans une nouvelle situation qu'il avait anticipée (proche du cap d'arrêt). C'est une phase à la temporalité plus longue et dont les actions correspondent principalement à de la surveillance de paramètres.

Puis à l'approche du cap d'arrêt, le pilote doit sortir du virage en remettant les ailes de l'avion à plat, c'est la troisième phase. Le moment choisi par le pilote pour entamer cette troisième phase est crucial car il détermine la souplesse de la manœuvre de sortie de virage pour ne pas être trop court ou ne pas dépasser le cap à suivre. Ce moment représente ce que les instructeurs nomment « le degré d'anticipation » ou tout simplement « l'anticipation », pour bien faire comprendre que la manœuvre doit être initiée un peu avant l'atteinte effective de la valeur du cap souhaité. De la même façon que la mise en virage, la sortie de virage a une temporalité assez courte.

Enfin, la dernière phase consiste à effectuer des petites actions correctives afin de corriger des potentiels écarts sur les différents paramètres (*e.g.* cap, vitesse, altitude, attitude, etc.).

L'analyse de ces quatre phases séparément permet d'étudier plus finement les comportements oculaires des pilotes durant ces virages. Cela permet également d'obtenir des métriques de performance plus fines correspondant à la performance séparée des actions des différentes phases. Par exemple dans le cas des virages, cela

permet de calculer la performance de maintien des 30° d'inclinaison durant la phase du corps du virage, le point d'anticipation au moment de la sortie de virage ou encore l'erreur de cap à la fin de cette même sortie de virage.

Afin d'identifier les différentes phases des virages de manière automatique et précise, nous avons développé un algorithme qui est présenté en détail dans annexe n°2 pour ne pas surcharger le manuscrit. La figure 50 illustre néanmoins la découpe que cet algorithme produit sur un virage à gauche. Bien que cet algorithme ait un fort pourcentage de découpes automatiques correctes, nous avons réalisé une vérification manuelle de la découpe de tous les virages. Ainsi pour les rares exceptions où l'algorithme se trouvait en difficulté face à la découpe précise de ces phases, il nous était possible d'ajuster ces dernières manuellement.

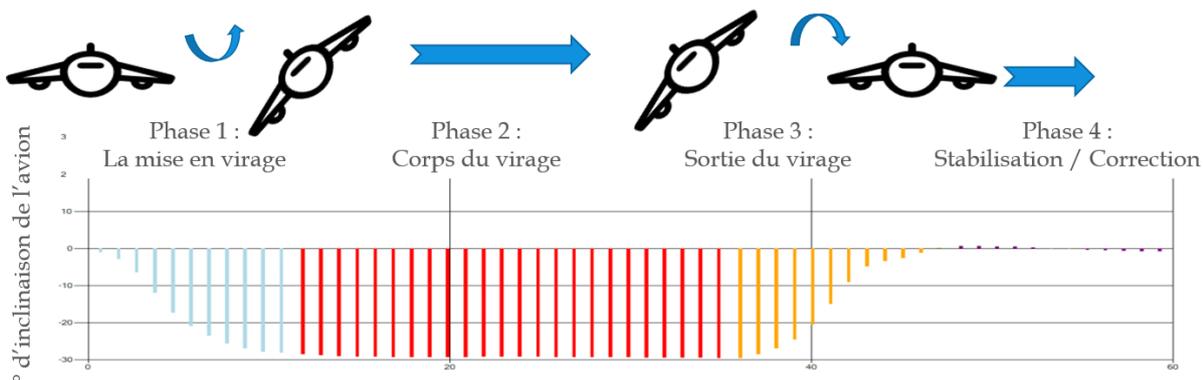


Figure 50 - Graphique affichant l'inclinaison de l'avion (ordonnée) sur le temps d'un virage par la gauche (abscisse) réalisé par un pilote-expert durant cette expérimentation. Chaque barre correspond à la moyenne de l'inclinaison en degré (°) réalisée sur 1 seconde. Chaque barre est espacée de 500ms et les couleurs correspondent à la phase à laquelle elles appartiennent. La couleur bleue correspond à la phase 1 de mise en virage, la couleur rouge à la phase 2 du corps du virage, la couleur orange à la phase 3 de sortie du virage et la couleur violette à la phase 4 de stabilisation de l'avion et correction des erreurs éventuelles.

Dans cette étude nous nous sommes intéressés principalement aux trois premières phases car elles constituent les actions principales de la réalisation de la manœuvre alors que la dernière phase correspond à la correction des erreurs éventuelles. Les paragraphes suivants détaillent l'expérimentation réalisée.

6.3 Méthode

6.3.1 Participants

Trente-huit pilotes de l'Armée de l'air française variant en expérience ont participé à notre étude. Cet échantillon comprend 11 instructeurs (Experts), 12 cadets et 15 étudiants novices dont deux femmes et trente-six hommes. Pour cinq participants (1 cadet et 4 novices), les données oculaires n'ont pas pu être enregistrées correctement en raison de problèmes d'étalonnage du dispositif d'*eye tracking*. Le Tableau 5 récapitule pour chaque groupe, l'âge moyen, le nombre d'heures de vol moyen sur cirrus SR20/22 et le nombre d'heures de vol total. Tous les participants avaient une vision normale.

	Novices		Cadets		Experts	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Âge	24	1.65	22.91	2.23	31.7	3.19
Nombre d'heures de vol su Cirrus SR20/22	10.18	4.82	45.18	5.38	520.9	255.16
Nombre d'heures de vol total (TFH)	41.14	39.21	112.22	61.18	1449	494.31

Tableau 5 - Récapitulatif pour les trois groupes expérimentaux de l'âge moyen, du nombre d'heures de vol moyen sur des Cirrus SR20 ou SR22 ainsi que du nombre d'heures de vol total moyen (TFH).

6.3.2 Matériels

Pour cette expérimentation, le simulateur du Cirrus SR20 a été utilisé (cf. 3.1) ainsi que l'*eye tracker* mobile Pertech cadencé à 50Hz (figures 49, 51).

6.3.3 Tâche de pilotage

Les participants étaient placés dans le simulateur aux commandes d'un Cirrus SR20. Il leur était demandé de maintenir un vol en palier rectiligne (sans perte d'altitude) à une vitesse constante (125kt) dans une direction également constante tant qu'aucune consigne ne leur était donnée. Un expérimentateur était présent et

donnait régulièrement des instructions pour la réalisation des manœuvres. Après chaque instruction donnée par l'expérimentateur, le participant devait réaliser la manœuvre concernée. Puis, une fois celle-ci terminée, ils devaient en annoncer la fin et revenir dans une situation de vol en palier rectiligne. Les consignes pour les manœuvres étaient données avec la phraséologie complète utilisée par les instructeurs militaires français pour éviter des biais de compréhension des consignes. Les manœuvres à réaliser étaient des manœuvres standards de la formation initiale de pilotage. Ces dernières comprenaient des virages par la droite ou par la gauche, des montées à vitesse optimale (« VOM ») et des descentes rapides dites « OPS ». Les virages devaient être exécutés à 30° d'inclinaison pour un changement de cap de 90°. Les montées devaient être réalisées à la vitesse de 115kt et correspondaient à un changement d'altitude de 1000ft. Et enfin les descentes devaient être réalisées à une vitesse constante de 150kt pour un changement d'altitude de 1500ft.



Figure 51 – Photographie d'un Capitaine de l'Armée de l'air en train de réaliser cette expérimentation.

6.3.4 Procédure

Après de brèves indications concernant notre étude, il était demandé aux participants de lire des explications pour éviter de potentiels biais. Ces dernières comprenaient le déroulement factuel de la séance ainsi que le rappel des procédures standards des différentes manœuvres qu'ils allaient être amenés à réaliser. Ensuite il leur était demandé de remplir un questionnaire démographique qui intégrait des questions portant sur leur expérience de vol sur les différents types d'avion.

A la suite de ce *briefing*, les participants s'installaient dans le simulateur et ils passaient 5 minutes aux commandes de l'avion afin de se familiariser avec les différents aspects du simulateur. Une fois cette familiarisation terminée, les participants étaient équipés avec le système d'*eye tracking* et la calibration de ce système était effectuée. Le vol commençait juste après. Les conditions météorologiques (beau temps) étaient maintenues constantes. Les participants débutaient le vol dans les mêmes conditions, c'est-à-dire dans un avion déjà en l'air à une altitude, localisation, vitesse et direction identiques pour tous. Avant chaque instruction de l'expérimentateur, ce dernier vérifiait que les participants maintenaient correctement le vol en palier rectiligne. Lorsque l'avion était stable et que tous les paramètres étaient dans leur zone de tolérance, l'expérimentateur demandait au participant de réaliser la manœuvre suivante. Le vol comprenait 20 manœuvres au total (5 de chaque type) proposées dans un ordre aléatoire.

6.3.5 Traitement des données et analyses statistiques

Nous avons utilisé le logiciel *open sources* OGAMA (Open Gaze And Mouse Analyzer) pour analyser les données oculaires en post-traitement. A partir de ce logiciel, nous avons défini des zones d'intérêt (figure 52) afin d'analyser la répartition du regard sur les différentes informations du cockpit. Les zones d'intérêt du cockpit correspondent aux informations de : puissance moteur, vitesse, cap, horizon artificiel, altitude et inclinaison de l'avion.



Figure 52 – Zones d'intérêt définies pour le cockpit à l'intérieur du PFD

Les mesures utilisées pour les analyses statistiques sont détaillées dans la partie suivante. Le tableau 6 récapitule néanmoins pour chaque mesure, si elle a été calculée sur la durée totale des virages et/ou sur les différentes phases de ces derniers.

Mesures de la performance de vol		
Variable	Virage entier	Phases du virage
Erreur d'altitude RMS ⁴	✓	
Erreur de vitesse RMS	✓	
Erreur d'inclinaison RMS		✓
Erreur de cap signée		✓
Cap d'anticipation		✓
Mesures du comportement oculaire		
Fréquence de fixation	✓	✓
Durée moyenne des fixations	✓	✓
Temps de fixation sur les instruments (AOI)	✓	✓

Tableau 6 – Tableau récapitulatif des mesures utilisées pour les tests statistiques ainsi que de la manière dont ces dernières ont été calculées : soit de manière classique sur la durée de la manœuvre entière, soit à l'aide de la découpe de cette manœuvre en quatre phases.

6.4 Résultats

Des analyses de la variance (ANOVA) ont été conduites avec le facteur "Expertise" (Novices ; Cadets ; Instructeurs) comme facteur inter-groupe. Ces ANOVA ont été

⁴ Root Mean Square : racine de la moyenne du carré

réalisées sur les mesures de performance de vol et de comportement oculaire. Le seuil de significativité a été fixé à 0.05.

6.4.1 Mesures de la performance

Erreur d'altitude RMS (Root Mean Square) : Il était demandé aux participants de maintenir le mieux possible l'altitude qu'ils avaient au début des virages. L'erreur d'altitude correspond donc à toute variation de l'altitude par rapport à celle au départ de la manœuvre. La figure 53 illustre cette erreur d'altitude durant les virages pour les trois groupes expérimentaux. Les résultats de l'ANOVA sur l'erreur d'altitude lors des virages montrent un effet simple significatif du facteur "Groupe", $F(2,30) = 6.6929$; $MSE = 1248.52$; $p = .00328$.

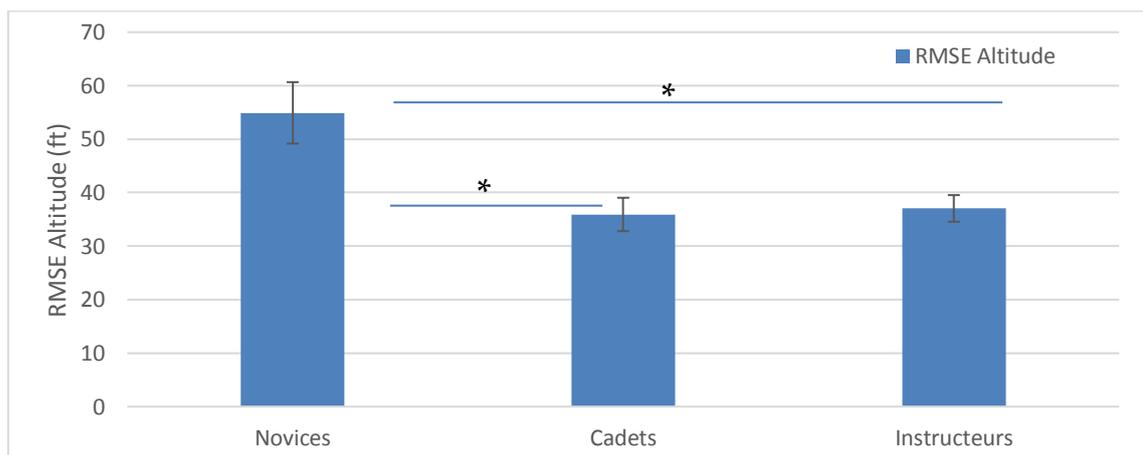


Figure 53 - Graphique présentant l'erreur moyenne (RMS) d'altitude obtenue lors de la réalisation des virages en pieds (ft) pour les différents groupes de pilotes de l'Armée de l'air française répartis en fonction de leur expérience. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standards.

Des tests *a posteriori* (*Newman-Keuls*) montrent que les Novices réalisent leurs virages avec une erreur d'altitude RMS (Moyenne = 54.920 ft, SE = 5.739) significativement plus grande que celle des Cadets (Moy = 35.93 ft, SE = 3.122), $p = .0065$, et que celle des instructeurs (Moy = 37.05 ft, SE = 2.49), $p = .0040$. L'erreur moyenne des cadets n'est cependant pas différente de celle des instructeurs, $p > .1$.

Erreur de vitesse RMS : A l'instar de l'altitude, il était demandé aux participants de conserver également la vitesse qu'ils avaient au début des virages. Toute variation est considérée comme une erreur. La figure 54 montre cette erreur moyenne de

vitesse durant les virages pour les différents groupes. Les résultats de l'ANOVA sur l'erreur de vitesse lors du virage montrent un effet simple significatif du facteur "Groupe", $F(2,30) = 4.1931$; $MSE = 4.01$; $p = .024786$.

Des tests *a posteriori* (Newman-Keuls) montrent que les Novices réalisent leurs virages avec une erreur de vitesse (Moy = 3.98 kt ; SE = 0.39) significativement plus grande que celle des Cadets (Moy = 2.87 kt ; SE = 0.254), $p = .031353$, et que celle des Instructeurs (Moy = 3.02 kt ; SE = 0.2), $p = .028842$. L'erreur moyenne des Cadets n'est pas différente de celle des Instructeurs, $p > .1$.

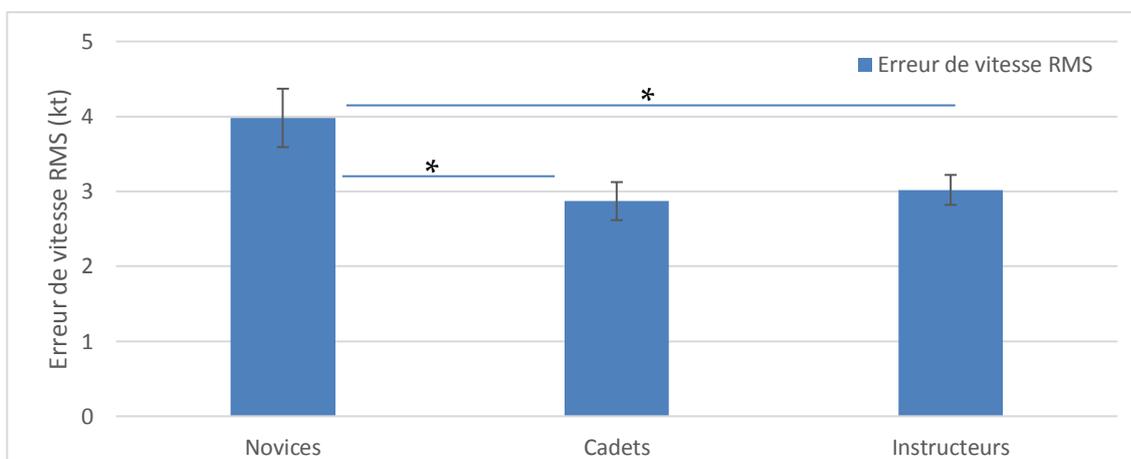


Figure 54 - Graphique illustrant l'erreur de vitesse en nœuds (kt) pour les différents groupes de pilotes durant les virages. Les barres d'erreurs affichent l'erreur standard.

Erreur inclinaison de l'avion (RMS) : Une autre consigne pour ces virages était de les réaliser à 30° d'inclinaison. Grâce à la découpe en phases, nous avons pu finement mesurer l'erreur d'inclinaison lors de la deuxième sous-phase du virage. La figure 55 montre les erreurs d'inclinaison moyennes pour les trois groupes expérimentaux. Les résultats de l'ANOVA sur l'erreur d'inclinaison montrent un effet simple significatif du facteur "Groupe", $F(2,30) = 3.8922$; $MSE = 2.81$; $p = .031414$.

Des tests *a posteriori* (Newman-Keuls) montrent que les Novices réalisent leurs virages avec une erreur d'inclinaison (Moy = 3.21° ; SE = 0.29) significativement plus grande que celle des Instructeurs (Moy = 2.20° ; SE = 0.1), $p = .027994$. L'erreur

d'inclinaison du groupe des Cadets (Moy = 2.79 ; SE = 0.31) n'est différente ni de celle des Instructeurs ($p > .1$) ni de celle des Novices ($p > .1$).

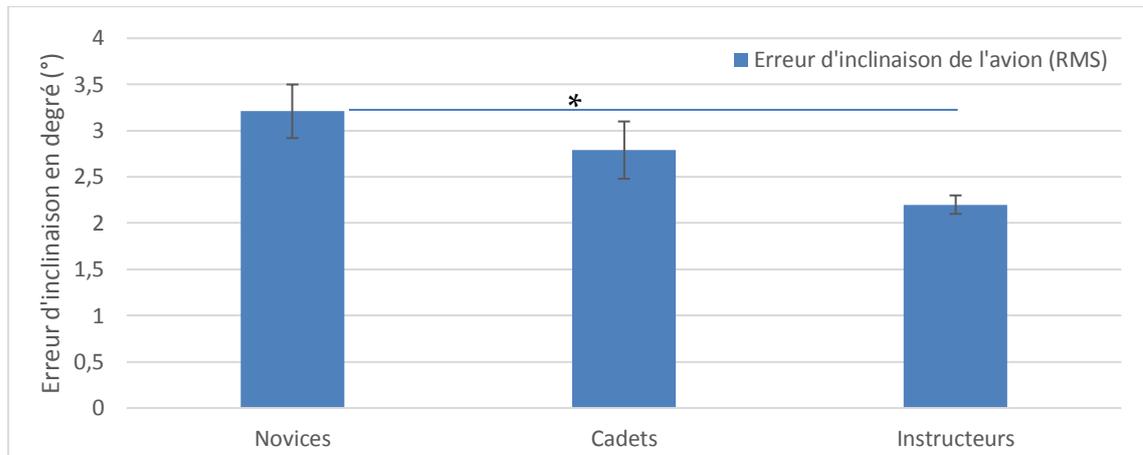


Figure 55 – Graphique montrant l'erreur d'inclinaison moyenne en degré (°) par rapport à la consigne des 30° d'inclinaison pour les trois groupes expérimentaux. Les barres d'erreur affichent l'erreur standard.

Erreur signée de cap : Pour chaque virage, il était donné aux participants un cap d'arrêt à respecter au plus près. Cette mesure correspond à la différence entre le cap demandé et le cap de l'avion à la fin de la sortie du virage (sous-phase 3). Cette mesure est calculée en relatif par rapport au cap demandé. Une valeur positive correspond à un dépassement du cap d'arrêt alors qu'une valeur négative correspond à un cap situé avant le cap d'arrêt. La figure 56 illustre cette mesure pour les trois groupes expérimentaux. Les résultats de l'ANOVA réalisée sur l'erreur signée de cap montrent un effet simple significatif du facteur "Groupe", $F(2,30) = 3.966$; $MSE = 7.479787$; $p = .029622$.

Des tests *a posteriori* (Newman-Keuls) montrent que les Instructeurs sortent du virage en moyenne -1.128° avant le cap d'arrêt (SE = 0.34) ce qui est significativement inférieur aux groupes de Novices ($p = .048$) et Cadets ($p = .0234$) qui sortent du virage respectivement en moyenne 0.326° (SE = 0.49) et 0.2717° (SE = 0.387) après le cap d'arrêt.

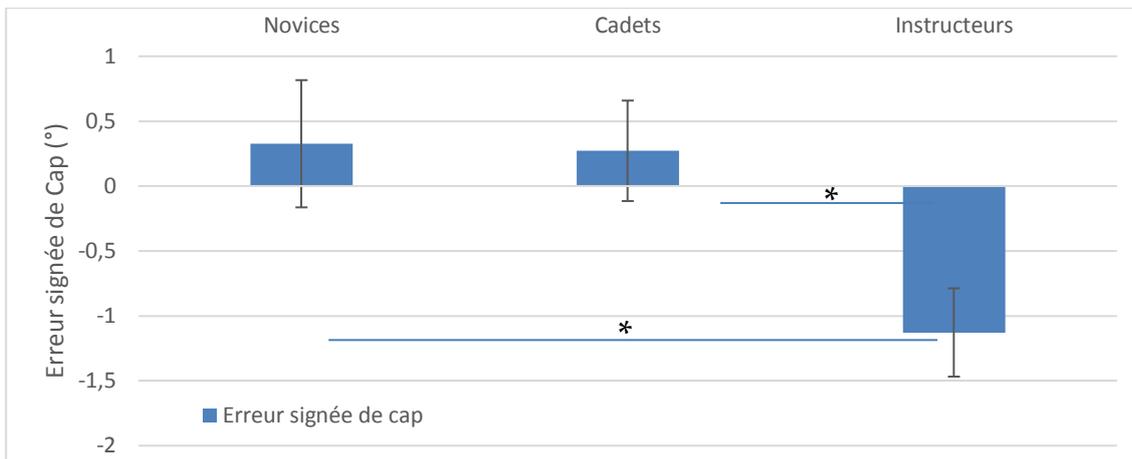


Figure 56 - Graphique affichant l'erreur signée de cap en degré relatif au cap d'arrêt (°) pour les trois groupes expérimentaux. Cette mesure a été réalisée en comparant le cap d'arrêt du virage demandé au participant avec le cap à la fin de la sortie de virage, soit à la fin de la phase 3. Les barres d'erreurs affichent l'erreur standard.

Cap d'anticipation : « L'anticipation » est un terme utilisé par les instructeurs pour définir le moment où doit s'initier la sortie de virage. Grâce à la découpe en sous-phases, nous avons pu observer à partir de quand les pilotes commençaient à redresser l'avion : c'est le cap d'anticipation (*i.e.* le début de la sous-phase 3). Pour un virage à 30° d'inclinaison, la consigne théorique donnée par les instructeurs durant la formation est de commencer à sortir du virage à 10° avant le cap d'arrêt. Les résultats de l'ANOVA sur le cap d'anticipation ne montrent pas d'effet simple du facteur "Groupe", $F(2,30) = .3198$; $MSE = 1.12$; $p > .1$.

On n'observe donc pas de différence statistique entre nos groupes expérimentaux. Nous les avons tous regroupés pour réaliser un second test (T-test), afin de comparer le comportement observé par rapport à la consigne théorique des 10° d'anticipation. Les résultats de ce test montrent une différence significative entre l'anticipation théorique et celle réalisée par les participants ($t(33) = 7.023$; $p < .05$). En effet, les participants sont sortis du virage en moyenne à 7.756° avant le cap d'arrêt (SD = 1.83) ce qui est donc significativement plus tard que la consigne théorique (*i.e.* 10°).

6.4.2 Mesures du comportement oculaire

Fréquence de fixation (nombre de fixations par minute) : La fréquence de fixation correspond au nombre de fixations réalisées par minute (figure 57). L'algorithme de détection des fixations utilisé par défaut dans OGAMA est celui décrit par Salvucci & Goldberg (2000) avec un seuil minimum de 100ms. Les résultats de l'ANOVA sur le nombre de fixations réalisées par minute (fix/min) sur la durée entière des virages montrent un effet simple significatif du facteur "Expertise", $F(2,30) = 8.966$; $MSE = 1.3682$; $p < .001$.

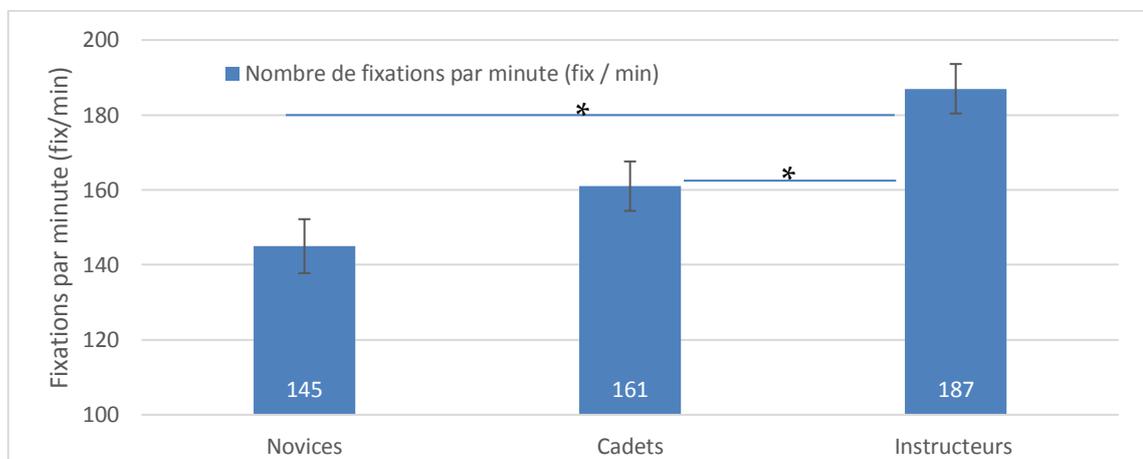


Figure 57 - Graphique présentant le nombre de fixations par minute durant la réalisation de virages à 30° d'inclinaison pour les trois groupes expérimentaux correspondant à des pilotes de l'Armée de l'air à différents moments de la formation de pilotage. Les barres d'erreur affichent l'erreur standard.

Des tests *a posteriori* (Newman-Keuls) montrent que les Instructeurs réalisent significativement plus de fixations par minute (Moyenne = 187.2 fix/min ; SE = 7.2) par rapport aux Cadets (Moyenne = 160.8 ; SE = 6.6), $p = .013$, et aux Novices (Moyenne = 145.2 ; SE = 6.6), $p < .001$, qui sont eux non différents $p > .1$.

Grâce à la décomposition de ces virages en sous-phases, nous avons pu conduire sur cette même mesure, une ANOVA avec le facteur Expertise (Novice, Cadets, Instructeurs) et le facteur Phase (phase 1, phase 2, phase 3) répétée sur le dernier facteur. Les résultats de cette analyse montrent un effet simple significatif du facteur Expertise ($F(2,30) = 5.890$; $MSE = 2.1539$; $p = .0069$) et du facteur Phase ($F(2,60) =$

8.35 ; $MSE = .3570$; $p < .001$). Ces résultats ne montrent pas d'effet d'interaction Expertise x Phase ($F(4,60) = 0.780$; $MSE = .0333$; $p > .1$).

Des tests *a posteriori* (Newman-Keuls) sur le facteur Phase montrent que la fréquence de fixations est significativement plus élevée lors de la phase 1 comparée à la phase 2 ($p = .0411$) elle-même tendancielle plus élevée que celle de la phase 3 ($p = .050067$).

Durée moyenne des fixations : La durée des fixations est une mesure généralement utilisée pour analyser des difficultés dans la récupération des informations visuelles (Fitts *et al.*, 1949 ; Rayner 1998). Les résultats de l'ANOVA sur la durée moyenne des fixations mesurée sur la durée totale des virages ne montrent pas d'effet simple du facteur "Expertise", $F(2,30) = .927$; $MSE = 1203$; $p > .1$.

Nous avons également réalisé sur ces données, une ANOVA avec le facteur Expertise (Novice, Cadets, Instructeurs) et le facteur Phase (phase 1, phase 2, phase 3) répétée sur le dernier facteur. Les résultats de cette analyse ne montrent pas d'effet du facteur Expertise ($F(2,30) = 1.126$; $MSE = 4900$; $p > .1$), montrent un effet simple significatif du facteur Phase ($F(2,60) = 10.405$; $MSE = 11869$; $p < .001$) mais ne montrent pas d'effet d'interaction Expertise x Phase significatif ($F(4,60) = 0.247$; $MSE = 281$; $p > .1$).

Des tests *a posteriori* (Newman-Keuls) sur le facteur simple Phase, montrent que la durée moyenne des fixations lors de la phase 3 (Moy = 293.09; SE = 10.26), est significativement plus grande que lors de la phase 1 (Moy = 257.11; SE = 7.77), $p = .00275$, et que lors de la phase 2 (Moy = 264.72; SE = 5.93), $p = .001277$. La durée des fixations n'est cependant pas significativement différente entre la phase 1 et la phase 2, $p > .1$.

Les résultats de ces analyses montrent une augmentation de la durée des fixations et une diminution de la fréquence de fixation notamment lors de la phase 3 ce qui est généralement synonyme d'augmentation de la charge de travail (Bellenkes *et al.*

1997 ; Schriver *et al.* 2008). La phase 3 semble poser plus de difficultés et demanderait ainsi davantage de ressources aux pilotes.

Temps de fixation sur les instruments : Nous avons calculé le temps de fixation sur les différents instruments (inclinaison de l'avion, vitesse, altitude, horizon et cap) afin d'identifier les informations principalement récupérées par les pilotes. Pour cette mesure, nous avons vérifié au préalable, que les durées d'exécution des virages ou des différentes phases n'étaient pas différentes entre les groupes. Les résultats de l'ANOVA sur la durée de réalisation des virages ne montrent pas d'effet simple significatif du facteur Expertise ($F(2,30) = 0.072 ; MSE = 222428.1 ; p > .1$). De la même façon, les résultats des ANOVA sur les durées des phases ne montrent pas d'effet simple significatif du facteur Expertise :

- **Phase 1** : $F(2,30) = 1.3837 ; MSE = 1893448 ; p > .1$.
- **Phase 2** : $F(2,30) = 1.811 ; MSE = 3937728 ; p > .1$.
- **Phase 3** : $F(2,30) = 2.0121 ; MSE = 998659 ; p > .1$.

Les durées de réalisation des virages et des phases du virage peuvent donc être considérées comme identiques pour tous les groupes. Les résultats des ANOVA sur le temps de fixation sur les différents instruments durant la durée totale des virages ne montrent, pour aucun d'entre eux, d'effet significatif du facteur Expertise :

- Inclinaison : $F(2,30) = 1.10759 ; MSE = 2676753 ; p > .1$.
- Vitesse : $F(2,30) = 0.203 ; MSE = 4361 ; p > .1$.
- Altitude : $F(2,30) = 1.2709 ; MSE = 2573653 ; p > .1$.
- Horizon : $F(2,30) = 2.35647 ; MSE = 3550550 ; p > .1$.
- Cap : $F(2,30) = 2.0878 ; MSE = 3273423 ; p > .1$.

Cependant, grâce à la découpe des virages en sous-phases, nous avons pu effectuer des analyses plus fines qui ont révélé des résultats intéressants. Les résultats des ANOVA réalisées sur les temps de fixation sur les différents instruments lors des 3 sous-phases sont récapitulés dans le tableau 7. De ces nombreuses analyses, seuls les résultats de l'ANOVA sur le temps de fixation sur l'altimètre durant la phase 2

ont montré un effet simple significatif du facteur Expertise. Des tests *a posteriori* (Newman-Keuls) montrent que le temps de fixation sur l'altimètre dans cette sous-phase 2 est significativement inférieur pour les Novices (Moy = 1272.645 ; SE = 123.1356) comparé à celui des Cadets (Moy = 1786.482 ; SE = 201.8), $p = .0084$, ainsi qu'à celui des Experts (Moy = 1787.318 ; SE = 134.7332), $p = .0219$. Ce temps total de fixation n'est pas différent entre les Experts et les Cadets, $p > .1$.

Phase	Instru	Puissance Moteur	Inclinaison	Vitesse	Altitude	Horizon	Cap
Phase 1		$F(2, 30) = .23436$; $MSE = 471.89$; $p > .1$	$F(2, 30) = .6275$; $MSE = 170510$; $p > .1$	$F(2, 30) = .14216$; $MSE = 1137$; $p > .1$	$F(2, 30) = .3112$; $MSE = 30960$; $p > .1$	$F(2, 30) = 2.18909$; $MSE = 193915$; $p > .1$	$F(2, 30) = 1.01965$; $MSE = 28466$; $p > .1$
Phase 2		$F(2, 30) = .56459$; $MSE = 4600.2$; $p >$.1	$F(2, 30) = .99369$; $MSE = 419938$; $p > .1$	$F(2, 30) = .205$; $MSE = 8416$; $p > .1$	$F(2, 30) = 3.3272$; $MSE = 1299324$; $p = .0104$	$F(2, 30) = 2.33478$; $MSE = 512280$; $p > .1$	$F(2, 30) = 1.3807$; $MSE = 904121$; $p > .1$
Phase 3		$F(2, 30) = 2.00277$; $MSE = 23600.4$; $p > .1$	$F(2, 30) = .61746$; $MSE = 20362.9$; $p > .1$	$F(2, 30) = .19451$; $MSE = 3256$; $p > .1$	$F(2, 30) = 1.7245$; $MSE = 151301$; $p > .1$	$F(2, 30) = .32184$; $MSE = 11219.6$; $p > .1$	$F(2, 30) = 1.11277$; $MSE = 57263$; $p > .1$

Tableau 7 – Résultats des ANOVA réalisées avec le facteur "Expertise" (Novices ; Cadets ; Instructeurs) comme facteur inter-groupe, sur le temps de fixation sur les différents instruments durant les 3 phases des virages (*i.e.* mise en virage, corps du virage et sortie de virage).

Ce résultat est cohérent avec la performance obtenue par les novices en termes de maintien de l'altitude (cf. 6.4.1). Il semblerait donc que cette gestion moins efficace du maintien de l'altitude soit en partie liée au fait que les novices regardent moins l'altimètre durant la phase 2.

6.5 Discussion

L'expérimentation décrite dans ce chapitre a permis d'identifier des éléments de la réalisation des virages qui différentient les pilotes militaires français en fonction de leur degré d'expertise (*i.e.* novices, cadets, experts). Les virages sont des manœuvres peu complexes à réaliser et les trois groupes les ont exécutés dans les marges de tolérance en vigueur dans les escadrons de formation. Cependant, nous avons pu mesurer que les novices commettaient des erreurs d'altitude plus importantes que les deux autres groupes, ce qui se traduit également par une variation de la vitesse plus importante. Ces erreurs sembleraient être dues en partie au fait que ces

derniers ne regarderaient pas suffisamment l'altimètre durant la sous-phase 2 (*i.e.* corps du virage). Il est à noter que les cadets semblent parfaitement maîtriser cet aspect-là puisqu'il n'est pas possible de les différencier des experts tant sur les erreurs d'altitude et de vitesse que sur le temps de fixation sur l'altimètre durant la sous-phase 2. C'est néanmoins sur deux autres mesures de performance obtenues grâce à la découpe des virages en sous-phases, que nous avons pu différencier les pilotes experts et les cadets. En effet, alors que les experts maintiennent les 30° d'inclinaison de l'avion durant la sous-phase 2 significativement mieux que les novices, les cadets ne sont statistiquement pas différents des deux autres groupes. L'autre mesure différenciant encore plus nettement les cadets des experts correspond à la différence avec le cap d'arrêt demandé en fin de sortie de virage. Sur cette mesure, les trois groupes montrent une belle précision quant à leur cap au moment de la remise à plat de l'avion. Il est cependant à noter que, contrairement aux cadets et aux novices qui remettent l'avion à plat exactement au moment où ils atteignent le cap d'arrêt, les pilotes experts semblent terminer leurs virages significativement plus tôt (*i.e.* environ 1 degré avant le cap d'arrêt). Ce résultat nécessite encore des recherches pour être correctement interprété, mais il permet cependant de différencier clairement les experts des autres groupes encore en formation.

Concernant le comportement oculaire, nous avons également identifié des différences intéressantes. Les mesures de la fréquence de fixation ont montré leur supériorité quant à la différenciation des pilotes en fonction de leur expertise par rapport aux mesures de performance. Ce constat est cohérent avec les résultats de l'étude de Kramer *et al.* (1994) portant justement sur ce sujet. Le fait que les pilotes experts fassent significativement plus de fixations par minute va dans le sens des résultats classiquement obtenus dans la littérature depuis les années 1950 (Fitts *et al.* 1949). Le principal bémol a concerné les différences que nous nous attendions à observer également entre les groupes sur la durée moyenne des fixations. En effet, comme Ottati *et al.* (1999) les analyses ont montré une absence de différence

significative entre les groupes sur cette mesure. Dans leur étude, Ottati *et al.* (1999), avaient émis l'hypothèse que cette absence de différence était due au faible écart d'expérience entre les groupes expérimentaux (*i.e.* seulement 45h de vol différence). Les résultats de notre étude réalisée avec des experts capitalisant bien plus d'heures de vol que les novices montrent qu'il pourrait y avoir d'autres interprétations possibles de ce phénomène. Nous pensons que dans le cadre de notre étude, la raison pourrait être que la manœuvre des virages sur seulement 90° de changement de cap ne constitue pas une difficulté suffisante pour différencier les différents groupes. C'est d'ailleurs le sentiment des instructeurs interrogés sur cette question au détour de leur participation à cette étude. Selon eux, un virage de 180 ou 360° aurait permis de mieux discriminer les groupes car la difficulté de maintenir les paramètres s'accroît avec la durée de la manœuvre. L'analyse future des manœuvres encore non exploitées de cette expérimentation (*i.e.* montées et descentes) devrait permettre d'approfondir cette hypothèse en raison du caractère plus difficile de ces manœuvres. Toutefois, l'analyse réalisée sur les différentes phases a permis d'identifier une augmentation significative du temps moyen de fixation accompagnée d'une diminution de la fréquence de fixation lors de la phase de sortie de virage. Il semblerait donc que cette troisième phase constitue un moment crucial du virage qui demanderait plus de ressources aux pilotes.

Toutes ces mesures nous ont permis de commencer à constituer cette banque de connaissances dont nous avons besoin pour envisager la création et l'utilisation de scénarios d'apprentissage pour la formation initiale de pilotage de l'Armée de l'air. Parmi tous ces résultats, nous avons sélectionné les mesures nous semblant les plus importantes à livrer à la communauté scientifique et professionnelle. Ces dernières sont récapitulées dans le tableau 8 ci-après.

Tableau de synthèse							
Expérience (nb heures sur Cirrus SR20)	Mesures de la performance				Mesures du comportement oculaire		
	RMSE Altitude	RMSE Vitesse	RMSE °inclinaison (Phase2)	Erreur Signée Cap d'arrêt	Fréquence de fixation Fix/min	Durée moyenne fixations (ms)	Durée entre 2 regards sur l'altitude (Phase 2, millisecondes)
Novices : (10h)	55 ft	4 kt	3.2 °	+ 0.32	145	276	1822ms
Cadets : (40h)	36 ft	3 kt	2.8 °	+ 0.27	161	284	1643ms
Experts : (550h)	37 ft	3 kt	2.2 °	- 1.13	187	264	1594ms

Tableau 8 - Synthèse des mesures du comportement oculaire et de la performance de vol permettant de différencier des pilotes militaires français de différents degrés d'expertise, durant la réalisation de virages à 30° d'inclinaison pour un changement de cap d'environ 90°

6.6 Conclusion

Cette expérimentation a permis de compléter la définition du comportement oculaire de référence dans le pilotage en fournissant des mesures quantitatives précises du comportement oculaire et de la performance de vol. Ces mesures permettent de réfléchir à la conception de scénarios d'apprentissage avec le PilotGazeTraining pour éduquer de nouvelles caractéristiques du comportement de référence. Bien que cette expérimentation nécessite l'analyse des manœuvres non encore exploitées pour aller plus loin dans la réflexion, elle permet néanmoins de commencer à envisager une application concrète des outils développés pour l'éducation du comportement oculaire dans la formation de pilotage de l'Armée de l'air.

Partie IV
Conclusion & Perspectives

Conclusions des recherches menées

Ces travaux de thèse prennent racine dans le contexte opérationnel de la formation initiale au pilotage d'aéronefs au sein de l'Armée de l'air. Cette formation a été marquée par l'arrivée de nouveaux aéronefs (Cirrus SR20) équipés de cockpits modernes (les *glass cockpits*) dont on sait qu'ils modifient l'activité de pilotage (rapport FITS, 2003), et par corollaire complexifient son enseignement. En lien avec le Centre de Formation Aérienne Militaire Initiale de l'Armée de l'air basé à Salon-de-Provence et les professionnels de la formation (pilotes et instructeurs-simulateur) qui y travaillent, nous avons engagé des travaux de recherche avec comme objectif opérationnel, l'optimisation de l'apprentissage du pilotage (« Aviating », Wickens, 2002). Dans cet apprentissage, le comportement oculaire du jeune élève-pilote était la composante qui paraissait être la plus problématique pour les instructeurs-pilotes. De plus, cela correspondait également à un des écueils liés aux *glass cockpits* identifiés comme importants dans la littérature du domaine (Funk

et al., 1999). Ainsi, les efforts se sont principalement portés sur la question de **l'optimisation de l'apprentissage du pilotage par l'amélioration des méthodes d'éducation du comportement oculaire**.

Dans différents domaines, les méthodes d'éducation du comportement oculaire ont démontré leur efficacité quant à leur capacité à optimiser le temps d'apprentissage d'une tâche. A durée d'entraînement égale, les personnes ayant bénéficié d'un enseignement portant sur leur comportement oculaire ont montré une supériorité dans la performance, l'efficience ou la résistance au stress lors de la réalisation de la tâche concernée (*i.e.* inspection visuelle, chirurgie laparoscopique, recherche visuelle, etc.). Ce principe d'éducation du comportement oculaire, qui apparaît séduisant et prometteur dans ces domaines respectifs, n'avait toutefois reçu que très peu de validation expérimentale dans le contexte du pilotage (Ziv, 2016). L'analyse de la littérature a révélé que ce manque de validation expérimentale pourrait être dû à des difficultés de mise en œuvre technique et méthodologique inhérentes à la nature dynamique et complexe de la situation de pilotage (Eyrolle, Mariné & Mailles, 1996). Il ressort également de cette littérature que les méthodes d'éducation du comportement oculaire identifiées n'étaient pas adaptées à cette situation.

Pour dépasser ces limitations, nous avons ainsi élaboré un nouveau paradigme d'éducation du comportement oculaire dont le principe fondateur est de « (a) donner *automatiquement* du **feedback** à l'apprenant, à partir de (b) **l'analyse en temps réel de son comportement oculaire** et sur la base de **règles comportementales** liées aux **caractéristiques du comportement de référence** (*i.e.* comportement à adopter) ». Pour pouvoir mettre en œuvre ce nouveau paradigme nous avons conçu et développé un nouvel outil informatique nommé le PilotGazeTrainer alias PiGaT. Cet outil permet la réception et l'analyse permanente d'un flux de données issues d'un *eye tracker* et, la production et l'affichage de notifications sonores et/ou visuelles. Durant cette thèse, nous avons souhaité **évaluer expérimentalement si l'éducation du comportement oculaire rendue possible par le PiGaT apportait des bénéfices** (*e.g.* gain de temps, de performance,

etc.) et **pouvait bien être utilisée dans le contexte du pilotage**. Par ailleurs, nous avons également pu étudier le comportement oculaire des pilotes militaires français avec l'ambition d'aller jusqu'à une application concrète de cette méthode d'éducation au contexte opérationnel de la formation initiale au pilotage au sein de l'Armée de l'air.

La mise en œuvre de notre méthode d'éducation a été réalisée sur un simulateur de vol ainsi que sur un micromonde de pilotage, *AbstractFlyingTask* alias AFT, développé également pour les besoins des recherches menées durant cette thèse. Deux premières expérimentations ont permis de valider que, techniquement, le PiGaT était utilisable correctement dans un simulateur de vol avec un *eye tracker* mobile et que les notifications qu'il permet de produire modifient durablement le comportement oculaire des personnes les recevant. Les résultats de ces expérimentations ont également permis de valider la valeur écologique de l'AFT eu égard à la situation de pilotage, notamment sur la nature de l'évolution du comportement oculaire des participants qui se sont entraînés librement sur ce micromonde. Nous avons ensuite réalisé une autre expérimentation visant à évaluer si notre méthode d'éducation amenait de réels bénéfices aux personnes concernées. Il apparaît clairement que cette méthode a permis d'éviter l'acquisition d'une mauvaise habitude de répartition du temps d'observation, ce qui a conduit à favoriser la capacité d'adaptation à des situations plus difficiles et plus complexes.

Durant cette thèse, nous avons ainsi développé une solution complète permettant d'éduquer le comportement oculaire dans la situation de pilotage et plus largement dans les situations dynamiques et complexes. Nous avons également démontré que cette nouvelle façon d'éduquer le comportement oculaire amenait une réelle plus-value fonctionnelle. Malgré cela, nous avons néanmoins besoin de mesures quantitatives fiables décrivant précisément le comportement à adopter (*i.e.*, le modèle de référence) dans la situation de pilotage, afin de pouvoir appliquer cette méthode dans le contexte opérationnel initial de cette thèse (*i.e.* la formation initiale de pilotage de l'Armée de l'air). L'étude des pilotes militaires français présentant

des niveaux d'expertise différents nous a permis de commencer à constituer une banque de connaissances qui servira à la conception de scénarios d'apprentissage (via le PiGaT) pertinents pour la formation de pilotage de l'Armée de l'air.

En résumé, ces travaux de thèse ont permis d'apporter plusieurs contributions théoriques, méthodologiques et appliquées.

Sur les plans théorique et méthodologique, ces travaux ont montré que dans le pilotage, l'étude des caractéristiques génériques du comportement oculaire est plus adaptée aux contraintes de cette situation dynamique et complexe que ne l'est l'étude des circuits visuels qui sont très dépendants d'une situation donnée. Ce constat nous a conduit à proposer une modélisation (cf. 2.1.2) de ces caractéristiques du comportement oculaire qui constitue dès lors un cadre commun dans lequel il est possible de comparer simplement le comportement des pilotes experts et novices.

Par l'étude des méthodes d'éducation du comportement oculaire existantes dans d'autres domaines que le domaine aéronautique, nous avons pu faire émerger une démarche générale à suivre pour mettre en œuvre ce type de méthode. Cette démarche est composée de 3 étapes principales : (1) la modélisation d'un comportement à atteindre (comportement de référence), (2) la mise en place de méthodes d'éducation pour modifier le comportement oculaire des apprenants afin qu'ils tendent vers le comportement de référence, et enfin, (3) la validation expérimentale d'une plus-value de cette éducation sur la réalisation de la tâche. La mise au jour et la diffusion de ce process dans la communauté scientifique devrait permettre d'aborder plus aisément et plus méthodiquement la démarche d'éducation du comportement oculaire dans n'importe quel contexte.

Sur un plan plus appliqué, nous avons développé deux outils informatiques à forts potentiels : le PilotGazeTrainer et l'AbstractFlyingTask. Ces deux outils ont la double vocation à être redistribués à la communauté scientifique et utilisés dans le

contexte spécifique de la formation de pilotage de l'Armée de l'air. D'un côté, le PilotGazeTrainer permet d'envisager des scénarios d'apprentissage permettant d'éduquer le comportement oculaire dans des tâches dynamiques et complexes variées (e.g. conduite automobile, contrôle aérien, etc.). D'un autre côté, l'AbstractFlyingTask propose un environnement permettant d'étudier l'activité de pilotage de manière contrôlée en laboratoire.

Nous avons également démontré expérimentalement que la « règle des 2 secondes » utilisée de manière empirique par les instructeurs permettait bien de lutter contre la mauvaise habitude du « *too much head-down time* ». Une des utilisations possibles du PiGaT pourrait être de permettre la constitution d'un guide pratique à destination des instructeurs contenant des préconisations de règles simples à mettre en place en situation de vol réel.

Ces travaux de recherche ne sont bien entendu pas exempts de limitations. Les principales résident dans le fait que nous n'avons pas encore étudié clairement les effets de l'éducation du comportement oculaire du PiGaT directement dans le pilotage. Nous avons fait le choix de réaliser les premiers tests de manière contrôlée sur un micromonde par précaution méthodologique et éthique vis-à-vis des pilotes de l'Armée de l'air. A la lumière des résultats obtenus qui n'ont pas généré d'effets négatifs rédhibitoires, il est dès lors envisageable de passer à l'étape suivante et de tester précisément notre méthode sur une population d'élèves-pilotes.

Une seconde limitation concerne le traitement des données de l'expérimentation décrite dans le chapitre 6. En effet, certaines manœuvres de vol (*i.e.* descentes et montées) n'ont pas encore été complètement analysées. Il sera ainsi nécessaire de compléter ces analyses pour terminer ce travail d'observation de la population cible des pilotes militaires.

Perspectives

La démarche générale mise en place dans ces travaux peut aisément être considérée comme de l'ingénierie des facteurs humains. Dans ce cadre-là, nous pouvons nous positionner dans le cycle de création-évaluation-compréhension résumant les principaux objectifs de cette ingénierie des facteurs humains illustrée par la figure 58. Durant cette thèse, nous avons conçu et développé différents outils pédagogiques (*i.e.* PiGaT et AFT) pour répondre à différents besoins (*i.e.* éduquer le comportement oculaire dans le pilotage et répliquer l'activité visuelle du pilotage en micromonde). Au travers des différentes expérimentations réalisées, nous avons évalué ces outils et avons notamment mis en évidence leurs potentiels respectifs. Toutefois, nous sommes restés au niveau de l'analyse comportementale et nous n'avons pas cherché à comprendre les implications de nos manipulations notamment sur les processus cognitifs. Dans ce cadre-là, il serait intéressant de mener des travaux complémentaires pour tenter d'accroître notre compréhension des causes et des conséquences liées à l'utilisation des outils informatiques développés.

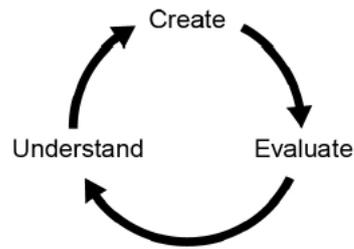


Figure 58 – Cycle de création-évaluation-compréhension, résumant les objectifs de l’ingénierie des facteurs humains (Lee, Wickens & Boyle, 2017).

Dans cette optique-là, nous avons d’ailleurs commencé à poser des premiers jalons (Froger, Blättler, Dubois, Camachon, & Bonnardel, 2017 ; Froger, Blättler, Dubois, Camachon, & Bonnardel, *Soumis*) en expliquant notamment que notre méthode d’éducation occasionne l’apprentissage d’un séquençage visuo-attentionnel contribuant à lutter contre la distraction. Les efforts devront bien entendu être encore poursuivis dans cette voie.

Un second axe de perspectives concernerait les applications concrètes de ces travaux dans le cadre de la formation initiale de pilotage de l’Armée de l’air. L’objectif initial d’optimiser cette formation pourrait, dans un futur proche, être effectivement envisagé. Durant cette thèse, nous avons été en lien avec les acteurs de cette formation pour la conception de notre simulateur Cirrus SR20, et pour l’expérimentation décrite dans le chapitre 6, réalisé sur ce dernier. Ces nombreux échanges ainsi que l’avancée des productions et validations de cette thèse permettent d’envisager plusieurs perspectives. La première concerne le PilotGazeTrainer qui pourrait être intégré dans les futurs simulateurs de formation de Salon-de-Provence. Ces simulateurs, développés par les Ateliers Industriels Aéronautiques de Cuers-Pierrefeu, sont fortement inspirés du simulateur conçu par nos soins (X-plane et SIMAvio) et dont ils ont pu expérimenter les contours avec ces travaux de thèse. Ces derniers simulateurs sont par exemple équipés de commandes de vols plus réalistes (figure 59), d’une vision extérieure affichée sur 3 écrans à l’aide de projecteurs et ont d’emblée été pensés de sorte à permettre l’intégration de notre système PiGaT. A l’heure de clore la rédaction de ce manuscrit, des essais sont d’ores et déjà prévus.

Une dernière perspective a été envisagée pour le micromonde AbstractFlyingTask qui a également montré son potentiel durant cette thèse. Sur le modèle du micromonde NASA-MATB, nous souhaiterions partager cet outil avec la communauté scientifique dans une version *open source* afin qu'il puisse être utilisé librement pour des expérimentations aussi diverses que variées. Sa proximité avec l'activité visuelle du pilotage en fait un outil pertinent dans le cadre d'études en laboratoire, de formations au pilotage, ou encore dans une optique de sélection de pilotes.

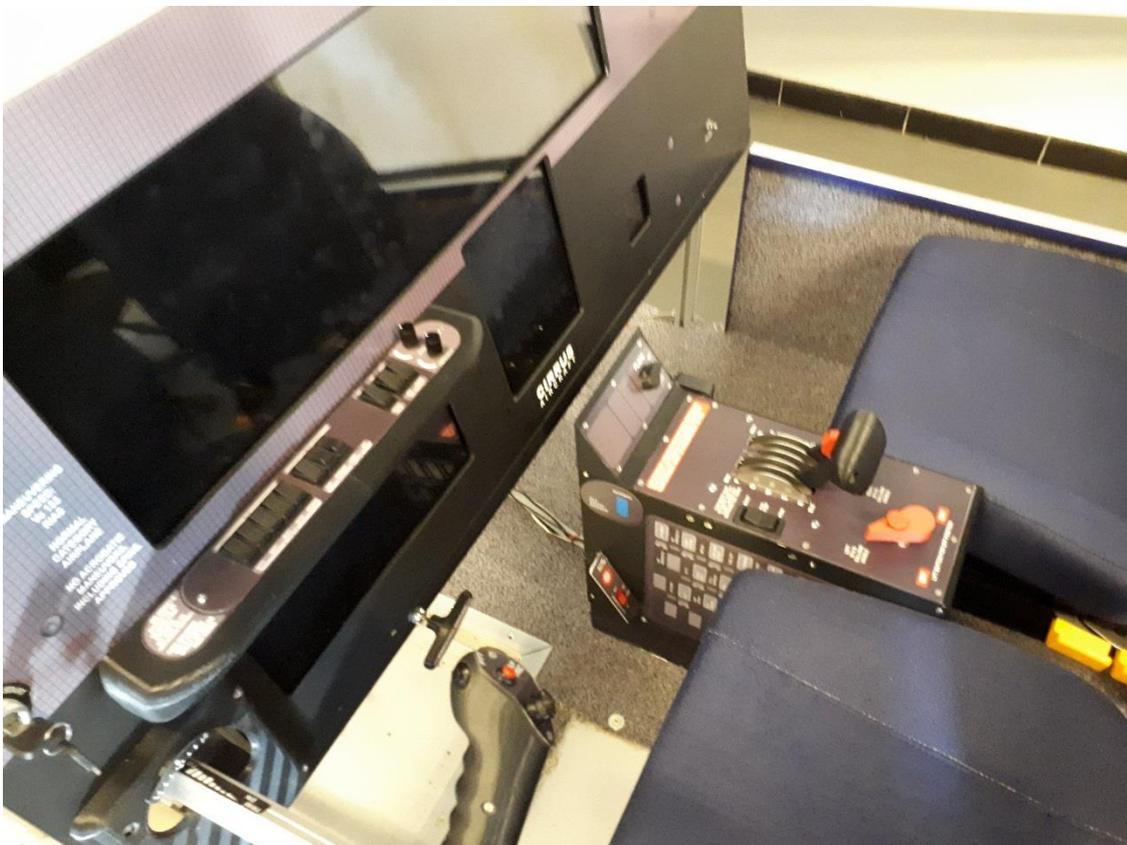
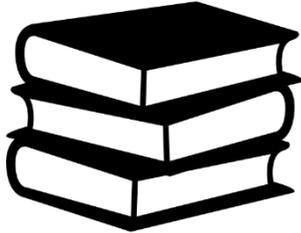


Figure 59 – Photographie du nouveau simulateur du Centre de Formation Aéronautique Militaire Initial (CFAMI) encore en conception.



Références bibliographiques

- Allen, J. J., Harmon-Jones, E., & Cavender, J. H. (2001). Manipulation of frontal EEG asymmetry through biofeedback alters self-reported emotional responses and facial EMG. *Psychophysiology*, 38(4), 685-693.
- Anderson, J. R. (2013). *The architecture of cognition*. Oxford, UK: Psychology Press.
- Bahill, A. T., & LaRitz, T. (1984). Why can't batters keep their eyes on the ball. *American Scientist*, 72(3), 249-253.
- Baker, S., & Marshall, E. (1989). Simulators for training and the evaluation of operator performance. In L. Bainbridge, & S. Antonio Ruiz Quintanilla (eds.), *Developing skills with information technology* (p. 293-314). New York, NY: Wiley.
- Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., & Van Gool, L. (2008). Speeded-up robust features (SURF). *Computer vision and image understanding*, 110(3), 346-359.
- Becic, E., Boot, W. R., & Kramer, A. F. (2008). Training older adults to search more effectively: scanning strategy and visual search in dynamic displays. *Psychology and aging*, 23, 461-466.
- Bellenkes, A. H., Wickens, C. D., & Kramer, A. F. (1997). Visual scanning and pilot expertise: the role of attentional flexibility and mental model development. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 68, 569-579.

- Benedetto, S., Pedrotti, M., Minin, L., Baccino, T., Re, A., & Montanari, R. (2011). Driver workload and eye blink duration. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 14(3), 199-208.
- Bertin, J. (1973). *Sémiologie graphique : Les diagrammes-Les réseaux-Les cartes*. Paris, France: EHESS.
- Binet, A. (1894). *Psychologie des grands calculateurs et joueurs d'échecs*. Paris, France : Hachette.
- Blascheck, T., Kurzhals, K., Raschke, M., Burch, M., Weiskopf, D., & Ertl, T. (2014, June). State-of-the-art of visualization for *eye tracking* data. In *EuroVis'14*, Swansea, Wales, UK.
- Boot, W. R., Kramer, A. F., Becic, E., Wiegmann, D. A., & Kubose, T. (2006). Detecting transient changes in dynamic displays: The more you look, the less you see. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 48(4), 759-773.
- Brehmer, B. (1992). Dynamic decision making: Human control of complex systems. *Acta Psychologica*, 81(3), 211-241.
- Brehmer, B., & Dörner, D. (1993). Experiments with computer-simulated microworlds: Escaping both the narrow straits of the laboratory and the deep blue sea of the field study. *Computers in Human Behavior*, 9(2-3), 171-184.
- Brehmer, B., Schifflett, S. G., Elliott, L. R., Salas, E., & Covert, M. D. (2004). Some reflections on microworld research. *Scaled worlds: Development, validation and applications*, 22-36.
- Brehmer, B. (2005). Micro-worlds and the circular relation between people and their environment. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 6(1), 73-93.
- Buisson, M., Bustico, A., Chatty, S., Colin, F. R., Jestin, Y., Maury, S., ... & Truillet, P. (2002). Ivy: un bus logiciel au service du développement de prototypes de systèmes interactifs. In *IHM'02 Proceedings of the 14th Conference on l'Interaction Homme-Machine* (p. 223-226). New York, NY: ACM.
- Camachon, C., Jacobs, D. M., Huet, M., Buekers, M., & Montagne, G. (2007). The role of concurrent feedback in learning to walk through sliding doors. *Ecological Psychology*, 19(4), 367-382.
- Carbonell, K. B., Stalmeijer, R. E., Könings, K. D., Segers, M., & van Merriënboer, J. J. (2014). How experts deal with novel situations: a review of adaptive expertise. *Educational Research Review*, 12, 14-29.
- Causse, M. (2016). *Le cerveau au travail : Optimiser la Performance Humaine par la Neuroergonomie (HDR)*. Université Paul Sabatier, Toulouse, France.
- Cauzinille-Marmeche, E., & Mathieu, J. (1994). Généralisation des connaissances et résolution de problèmes. *L'année psychologique*, 94(3), 461-484.

- Chanquoy, L., Tricot, A., & Sweller, J. (2007). *La charge cognitive*. Paris, France: Armand Colin.
- Chapman, P. R., & Underwood, G. (1998). Visual search of driving situations: Danger and experience. *Perception*, 27(8), 951-964.
- Chase W. G., Simon H. A. (1973). Perception in chess. *Cognitive Psychology*, 4, 55 - 81.
- Colvin, K., Dodhia, R., & Dismukes, R. K. (2005). Is pilot's visual scanning adequate to avoid mid-air collisions? In *Proceedings of the 13th International Symposium on Aviation*, (pp. 104-109).
- Comstock Jr, J. R., & Arnegard, R. J. (1992). The multi-attribute task battery for human operator workload and strategic behavior research. Hampton, USA: National Aeronautics and Space Administration.
- Conversy, S. (2015). De la pré-attentivité des conjonctions visuelles. In *27ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine*. (p. alt2).
- Dalmajer, E. (2014). Is the low-cost EyeTribe *eye tracker* any good for research? *PeerJ PrePrints*, 2 (No.e585v1). Repéré à <https://peerj.com/preprints/585v1/>
- De Corte, E., Verschaffel, L., & Pauwels, A. (1990). Influence of the semantic structure of word problems on second graders' eye movements. *Journal of Educational Psychology*, 82(2), 359-365.
- De Groot A. D. (1965). *Thought and Choice in Chess*. The Hague, Pays Bas : Mouton Publishers.
- Didierjean, A., Ferrari, V., & Marmèche, E. (2004). L'expertise cognitive au jeu d'échecs : quoi de neuf depuis De Groot (1946) ?. *L'année psychologique*, 104(4), 771-793.
- DiFonzo, N., & Bordia, P. (1997). Rumor and prediction: Making sense (but losing dollars) in the stock market. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 71(3), 329-353.
- Donchin, E. (1995). Video games as research tools: The Space Fortress game. *Behavior Research Methods*, 27(2), 217-223.
- Dörner, D., & Schaub, H. (1994). Errors in Planning and Decision-making and the Nature of Human Information Processing. *Applied Psychology*, 43(4), 433-453.
- Dubois, E., Camachon, C., Blättler, C., & Hurter, C. (2016). Evaluation du dispositif PiGaT pour l'entraînement des stratégies visuelles d'élèves pilotes. In *Actes de la 28ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine* (p. 117-187). Fribourg, Switzerland. ACM.
- Dubois, E., Blättler, C., Camachon, C., & Hurter, C. (2015). Eye Movements Data Processing for Ab Initio Military Pilot Training. In *Intelligent Decision Technologies* (p. 125-135). London, UK: Springer International Publishing.

- Duchowski, A. (2007). *Eye tracking methodology: Theory and practice*. London, UK: Springer.
- Duchowski, A. T. (2002). A breadth-first survey of eye-tracking applications. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 34(4), 455-470.
- Edwards, W. (1962). Dynamic decision theory and probabilistic information processing. *Human Factors* 4, 59-73.
- Endsley, M. R., & Garland, D. J. (2000). Theoretical underpinnings of situation awareness: A critical review. In Endsley, M. R., & Garland, D. J. (Eds). *Situation awareness analysis and measurement* (pp. 3-32). Mahwah, USA: Lawrence Erlbaum Associates.
- Ericsson, K. A., Charness, N., Feltovich, P. J., & Hoffman, R. R. (Eds.). (2006). *The Cambridge handbook of expertise and expert performance*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Eyrolle, H., Mariné, C., & Mailles, S. (1996). La simulation des environnements dynamiques : intérêts et limites. In Cellier, J.-M., De Keyser, V., Valot, C. (Eds), *La gestion du temps dans les environnements dynamiques* (pp. 103-121). Paris, France: Presses Universitaires de France.
- Federal Aviation Administration. (1998). Scanning for Other Aircraft. Aeronautical Information Manual, 8-1-6-c. Oklahoma City, OK: Author.
- Fiduccia, P., Wright, B., Ayers, F., Edberg, J., Foster, L., Henry, M., Seiwert, D. *et al.* (2003). General aviation technically advanced aircraft FAA-industry safety study, final report.
- Fitts, P. M., Jones, R. E., & Milton, J. L. (1950). Eye movements of aircraft pilots during instrument-landing approaches. *Aeronautical Engineering Review*, 9, 1-5.
- Foss, M. A., Fabiani, M., Mané, A. M., & Donchin, E. (1989). Unsupervised practice: The performance of the control group. *Acta Psychologica*, 71(1-3), 23-51.
- Froger, G., Blättler, C., Dubois, E., Camachon, C., & Bonnardel, N. (2017). L'apprentissage d'un séquençage visuo-attentionnel pour lutter contre la distraction en contexte aéronautique de double tâche. In *9ème conférence de Psychologie Ergonomique (EPIQUE)*, Dijon.
- Funk, K., Lyall, B., Wilson, J., Vint, R., Niemczyk, M., Suroteguh, C., & Owen, G. (1999). Flight deck automation issues. *The International Journal of Aviation Psychology*, 9(2), 109-123.
- Gonzalez, C., Vanyukov, P., & Martin, M. K. (2005). The use of microworlds to study dynamic decision making. *Computers in human behavior*, 21(2), 273-286.
- Gopher, D., Well, M., & Bareket, T. (1994). Transfer of skill from a computer game trainer to flight. *Human Factors*, 36(3), 387-405.

- Gray, W. D. (2002). Simulated task environments: The role of high-fidelity simulations, scaled worlds, synthetic environments, and laboratory tasks in basic and applied cognitive research. *Cognitive Science Quarterly*, 2, 205–227
- Guthrie, E. R. (1935). *Psychology of Learning*. New York, NY: Harper.
- Gutzwiller, R. S., Wickens, C. D., & Clegg, B. A. (2014). Workload overload modeling: An experiment with MATB II to inform a computational model of task management. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 58, No. 1, pp. 849-853). Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- Hatano, G. Inagaki, (1986). Two courses of expertise. *Child development and education in Japan*. New York, NY: WH Freeman.
- Hegarty, M., Mayer, R. E., & Green, C. E. (1992). Comprehension of arithmetic word problems: Evidence from students' eye fixations. *Journal of Educational Psychology*, 84(1), 76-84.
- Hoc, J.-M., & Plee, G. (1996). Délai de réponse, planification et facteurs de coût en situation dynamique. In Hoc, J.-M., & Plee, G. (Eds). *Ergonomie de la conduite des processus industriels*, Paris, France : Institut National de Recherche et de Sécurité.
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H., & Van de Weijer, J. (2011). *Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures*. Oxford, UK : Oxford University Press.
- Holyoak, K. J. (1991). Symbolic connectionism: toward third-generation theories of expertise. In K.A. Ericsson & J. Smith (dir.), *Toward a General Theory of Expertise* (p. 30–335). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Huet, M., Jacobs, D. M., Camachon, C., Goulon, C., & Montagne, G. (2009). Self-controlled concurrent feedback facilitates the learning of the final approach phase in a fixed-base flight simulator. *Human factors*, 51(6), 858-871.
- Hurter, C., Ersoy, O., Fabrikant, S., Klein, T., & Telea, A. (2013). Bundled Visualization of Dynamic Graph and Trail Data. (TVCG) *Visualization and Computer Graphics, IEE Transactions on*, vol. PP(99), 1.
- Hurter, C., Tissoires, B., & Conversy, S. (2009). FromDaDy: Spreading data across views to support iterative exploration of aircraft trajectories. *IEEE TVCG*, 15(6), 1017-1024.
- Imbert, J. P. (2014). Adaptation du design des visualisations de type supervisions pour optimiser la transmission des notifications classées par niveau d'intérêt (Thèse de doctorat). Université de Toulouse, France.
- Imbert, J.-P, Hodgetts, H. M., Parise, R., Vachon, F., & Tremblay, S. (2014). The LABY microworld: A platform for research, system engineering, and training in air traffic control. In HFES'14 (Human Factors and Ergonomic Society annual conference), Chicago, USA.

- ISO/TR 9241-100:2010 (2010) Ergonomics of Human-System Interaction – Part 100: Introduction to Standards Related to Software Ergonomics, International Organisation for Standardization (ISO)
- Janelle, C. M., Barba, D. A., Frehlich, S. G., Tennant, L. K., & Cauraugh, J. H. (1997). Maximizing performance feedback effectiveness through videotape replay and a self-controlled learning environment. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 68(4), 269-279.
- Janelle, C. M., & Hatfield, B. D. (2008). Visual attention and brain processes that underlie expert performance: Implications for sport and military psychology. *Military Psychology*, 20(S1), S39.
- Jarodzka, H., Balslev, T., Holmqvist, K., Nyström, M., Scheiter, K., Gerjets, P., & Eika, B. (2012). Conveying clinical reasoning based on visual observation via eye-movement modelling examples. *Instructional Science*, 40(5), 813-827.
- Jodlowski, M. T., Doane, S. M., & Brou, R. J. (2003). Adaptive expertise during simulated flight. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 47(19), 2028-2032. Los Angeles, CA : SAGE Publications.
- Jones, D. G., & Endsley, M. R. (1996). Sources of situation awareness errors in aviation. *Aviation, space, and environmental medicine*, 67(6), 507-512.
- Kasarskis, P., Stehwien, J., Hickox, J., Aretz, A., & Wickens, C. (2001). Comparison of expert and novice scan behaviors during VFR flight. In *Proceedings of the 11th International Symposium on Aviation Psychology*, (pp. 1-6). Columbus, OH : The Ohio State University
- Karpinsky, N. D., Chancey, E. T., & Yamani, Y. (2016). Modeling Relationships among Workload, Trust, and Visual Scanning in an Automated Flight Task. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 60, No. 1, pp. 1550-1554). Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- Kelley, J. F. (1984). An iterative design methodology for user-friendly natural language of-fice information applications. *ACM Transactions on Information Systems*, 2 (1), 26–41.
- Kramer, A., Tham, M., Konrad, C., Wickens, C., & Lintern, G. (1994). Instrument scan and pilot expertise. In *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, 38(1), 36-40.
- Land, M. F., & Furneaux, S. (1997). The knowledge base of the oculomotor system. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 352(1358), 1231-1239.
- Landers, D. M., Petruzzello, S. J., Salazar, W., Crews, D. J., Kubitz, K. A., Gannon, T. L., & Han, M. (1991). The influence of electrocortical biofeedback on performance in pre-elite archers. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 23, 123-129.

- Lavery, J. J. (1962). Retention of simple motor skills as a function of type of knowledge of results. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 16, 300.
- Lee, T. D., & Carnahan, H. (1990). Bandwidth knowledge of results and motor learning: More than just a relative frequency effect. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 42(4), 777-789.
- Lee, J., Wickens, C., Liu, Y. & Boyle, L. (2017). Designing for people : an introduction to human factors engineering. Charleston, S.C: CreateSpace.
- Leff, D. R., James, D. R., Orihuela-Espina, F., Kwok, K. W., Sun, L. W., Mylonas, G., ... & Yang, G. Z. (2015). The impact of expert visual guidance on trainee visual search strategy, visual attention and motor skills. *Frontiers in human neuroscience*, 9, 526.
- Lefrancois, O., Matton, N., Gourinat, Y., Peysakhovich, V., & Causse, M. (2016). The role of Pilots' monitoring strategies in flight performance. In *European Association for Aviation Psychology Conference EAAP32*. Cascais, Portugal.
- Leplat, J., & Bisseret, A. (1965). Analyse des processus de traitement de l'information chez le contrôleur de la navigation aérienne. *Bulletin du CERP*, 14(1-2), 331-357.
- Lhuillier, A., Hurter, C., & Telea, A. (2017). FFTEB: Edge bundling of huge graphs by the Fast Fourier Transform. In *PacificVis 2017, 10th IEEE Pacific Visualization Symposium*. Seoul, Korea.
- Mané, A., & Donchin, E. (1989). The space fortress game. *Acta psychologica*, 71(1-3), 17-22.
- Mariné, C., Cellier, J. M., & Valax, M. F. (1988). Dimensions de l'expertise dans une tâche de régulation de trafic: règles de traitement et profondeur du champ spatio-temporel.
- Mattes, S. (2003). The lane change task as a tool for driver distraction evaluation. In H. Strasser, H. Rausch, & H. Bubb (Eds.), *Quality of work and products in enterprises of the future* (pp. 57–60). Stuttgart, Deutschland: Ergonomia Verlag.
- Matton, N., Paubel, P., Cegarra, J., & Raufaste, E. (2016). Differences in Multitask Resource Reallocation After Change in Task Values. *Human factors*, 58(8), 1128-1142.
- Miller, J. M. (1973). Visual behavior changes of student pilots flying instrument approaches. In *Human Factors Society, Annual Meeting, 17th*, Washington, D. C (pp. 208-214).
- Mourant, R. R., & Rockwell, T. H. (1972). Strategies of visual search by novice and experienced drivers. *Human factors*, 14(4), 325-335.
- Mumaw, R. J., Sarter, N., & Wickens, C. D. (2001). Analysis of pilots' monitoring and performance on an automated flight deck. In *Proceedings of the 11th*

International Symposium on Aviation Psychology. Columbus, OH : The Ohio State University.

- Nalanagula, D., Greenstein, J. S., & Gramopadhye, A. K. (2006). Evaluation of the effect of feedforward training displays of search strategy on visual search performance. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36(4), 289-300.
- Newell, A., & Simon, H. A. (1972). Human problem solving (Vol. 104, No. 9). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Nieuwenhuys, A., Pijpers, J. R., Oudejans, R. R., & Bakker, F. C. (2008). The influence of anxiety on visual attention in climbing. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 30(2), 171-185.
- Omodei, M. M., & Wearing, A. J. (1995). The Fire Chief microworld generating program: An illustration of computer-simulated microworlds as an experimental paradigm for studying complex decisionmaking behavior. *Behavior Research methods, Instruments, & Computers*, 27, 303–316.
- Ottati, W. L., Hickox, J. C., & Richter, J. (1999). Eye scan patterns of experienced and novice pilots during visual flight rules (VFR) navigation. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 43(1), 66-70. Los Angeles, CA : SAGE Publications.
- Parise, Imbert, Morais, & Alonso (2012). LABY : Un support d'aide à l'évaluation de choix de conception d'IHM pour le contrôle aérien. In *Proceedings of ErgoIHM 2012*. Biarritz, France.
- Rajivan, P. (2011). CyberCog A Synthetic Task Environment for Measuring Cyber Situation Awareness. Arizona State University.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological bulletin*, 124(3), 372.
- Reingold E. M., Charness N., Pomplun M., Stampe D. M. (2001). Visual span in expert chess players : Evidence from eye movements. *Psychological Science*, 12, 48-55.
- Rigas, G., Carling, E., & Brehmer, B. (2002). Reliability and validity of performance measures in microworlds. *Intelligence*, 30(5), 463-480.
- Ripoll, H., Bard, C., & Paillard, J. (1986). Stabilization of head and eyes on target as a factor in successful basketball shooting. *Human Movement Science*, 5(1), 47-58.
- Robinski, M., & Stein, M. (2013). Tracking visual scanning techniques in training simulation for helicopter landing. *Journal of Eye Movement Research*, 6(2), 1-17.
- Robinson, A., Mania, K., & Perey, P. (2004). Flight simulation: research challenges and user assessments of fidelity. In *Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH international conference on Virtual Reality continuum and its applications in industry* (pp. 261-268). Ney York, NY : ACM.

- Ronsse, R., Puttemans, V., Coxon, J. P., Goble, D. J., Wagemans, J., Wenderoth, N., & Swinnen, S. P. (2010). Motor learning with augmented feedback: modality-dependent behavioral and neural consequences. *Cerebral cortex*, 21(6), 1283-1294.
- Sadasivan, S., Greenstein, J. S., Gramopadhye, A. K., & Duchowski, A. T. (2005). Use of eye movements as feedforward training for a synthetic aircraft inspection task. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (pp. 141-149). New York, NY : ACM.
- Salmoni, A. W., Schmidt, R. A., & Walter, C. B. (1984). Knowledge of results and motor learning: a review and critical reappraisal. *Psychological bulletin*, 95(3), 355-386.
- Santiago-Espada, Y., Myer, R. R., Latorella, K. A., & Comstock Jr, J. R. (2011). The Multi-Attribute Task Battery II (MATB-II) Software for Human Performance and Workload Research: A User's Guide. Hampton, USA : National Aeronautics and Space Administration.
- Schmidt, R. A., & Debû, B. (1993). *Apprentissage moteur et performance*. Paris, France : Vigot.
- Schrivver, A. T., Morrow, D. G., Wickens, C. D., & Talleur, D. A. (2008). Expertise differences in attentional strategies related to pilot decision making. *Human Factors*, 50(6), 864-878.
- Schvaneveldt, R., Beringer, D. B., Lamonica, J., Tucker, R., & Nance, C. (2000). *Priorities, organization, and sources of information accessed by pilots in various phases of flight*. Washington D.C. : Office of Aviation Medecine.
- Shapiro, K. L., & Raymond, J. E. (1989). Training of efficient oculomotor strategies enhances skill acquisition. *Acta Psychologica*, 71(1), 217-242.
- Sherwood, D. E. (1988). Effect of bandwidth knowledge of results on movement consistency. *Perceptual and Motor Skills*, 66(2), 535-542.
- Smith, E. M., Ford, J. K., & Kozlowski, S. W. J. (1997). Building adaptive expertise: Implications for training design. *Training for a rapidly changing workplace: Applications of psychological research*, 89-118.
- Sullivan, J., Yang, J. H., Day, M., & Kennedy, Q. (2011). Training simulation for helicopter navigation by characterizing visual scan patterns. *Aviation, space, and environmental medicine*, 82(9), 871-878.
- Suppes, P. (1990). Eye-movement models for arithmetic and reading performance. *Reviews of Oculomotor Research*, 4, 455-477.
- Thorndike, E. L. (1927). The law of effect. *The American Journal of Psychology*, 39(1/4), 212-222.

- Tien, T., Pucher, P. H., Sodergren, M. H., Sriskandarajah, K., Yang, G. Z., & Darzi, A. (2014). Eye tracking for skills assessment and training: a systematic review. *Journal of surgical research*, 191(1), 169-178.
- Trowbridge, M. H., & Cason, H. (1932). An experimental study of Thorndike's theory of learning. *The Journal of General Psychology*, 7(2), 245-260.
- Turkle, S. (1985). The second self: Computers and the human spirit. *Australasian Journal of Philosophy*, 63, 520.
- Vachon, F., Vallières, B. R., Jones, D. M., & Tremblay, S. (2012). Nonexplicit change detection in complex dynamic settings: What eye movements reveal. *Human Factors*, 54(6), 996-1007.
- van Lehn, K., & Chi, M. (2012). Adaptive expertise as acceleration of future learning (pp. 28- 45). West Nyack, NY: Cambridge University Press.
- van de Merwe, K., van Dijk, H., & Zon, R. (2012). Eye movements as an indicator of situation awareness in a flight simulator experiment. *The International Journal of Aviation Psychology*, 22(1), 78-95.
- Vickers, J. N. (1996). Visual control when aiming at a far target. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22(2), 342-354.
- Vine, S. J., Masters, R. S., McGrath, J. S., Bright, E., & Wilson, M. R. (2012). Cheating experience: Guiding novices to adopt the gaze strategies of experts expedites the learning of technical laparoscopic skills. *Surgery*, 152(1), 32-40.
- Voßkühler A., Nordmeier, V., Kuchinke, L., & Jacobs, A. M. (2008). OGAMA (Open Gaze and Mouse Analyzer): open-source software designed to analyze eye and mouse movements in slideshow study designs. *Behavior research methods*, 40(4), 1150-1162.
- Wang, Q., Celebi, F. M., Flink, L., Greco, G., Wall, C., Prince, E., Lansiquot S., Chawarska K., Kim E. S., Boccanfuso L., Shic F. & DiNicola, L. (2015). Interactive eye tracking for gaze strategy modification. In *Proceedings of the 14th International Conference on Interaction Design and Children* (pp. 247-250). New York : ACM.
- Wang, L., Li, H., Dongb, D., & Shu, X. (2015). Relationship between the technical skills and eye-movement indicators of pilots. In *Proceedings 19th Triennial Congress of the IEA* (Vol. 9, p. 14).
- Wass, S., Porayska-Pomsta, K., & Johnson, M. H. (2011). Training attentional control in infancy. *Current biology*, 21(18), 1543-1547.
- Wetzel, P. A., Anderson, G. M., & Barelka, B. A. (1998). Instructor use of eye position based feedback for pilot training. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 42(20), (pp. 1388-1392). Los Angeles, CA : SAGE Publications.

- Wickens, C. D. (2002). Situation awareness and workload in aviation. *Current directions in psychological science*, 11(4), 128-133.
- Wilson, M. R., Vine, S. J., Bright, E., Masters, R. S., Defriend, D., & McGrath, J. S. (2011). Gaze training enhances laparoscopic technical skill acquisition and multi-tasking performance: a randomized, controlled study. *Surgical endoscopy*, 25(12), 3731-3739.
- Winstein, C. J., & Schmidt, R. A. (1990). Reduced frequency of knowledge of results enhances motor skill learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 16(4), 677-691.
- Wright, S., & O'Hare, D. (2015). Can a *glass cockpit* display help (or hinder) performance of novices in simulated flight training?. *Applied ergonomics*, 47, 292-299.
- Wynn, T., & Richardson, J. H. (2008). Comparison of subjective workload ratings and performance measures of a reference IVIS task. Loughborough, UK : HUMANIST Publications.
- Xiong, W., Wang, Y., Zhou, Q., Liu, Z., & Zhang, X. (2016). The Research of Eye Movement Behavior of Expert and Novice in Flight Simulation of Landing. In *International Conference on Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics* (pp. 485-493). London, UK : Springer International Publishing.
- Zijlstra, F.R.H., Van Doorn, L., (1985). The Construction of a Scale to Measure Perceived Effort. Technical Report. Delft University of Technology.
- Ziv, G. (2016). Gaze Behavior and Visual Attention: A Review of Eye Tracking Studies in Aviation. *The International Journal of Aviation Psychology*, 26(3-4), 75-104.

Table des illustrations

<i>Figure 1 - Cockpit analogique (a) vs glass cockpit (b)</i>	12
<i>Figure 2 - Capture d'écran d'une version du jeu Space Fortress</i>	32
<i>Figure 3 – Affichage de la soute d'un avion-cargo en environnement virtuel, augmenté de l'affichage du circuit visuel des experts Sadasivan et al. (2005).</i>	34
<i>Figure 4 – Illustration des trois visualisations de la stratégie experte utilisée par Nalanagula et al. (2005) en surimpression de circuits électriques.</i>	35
<i>Figure 5 – Image schématisant le principe de la chirurgie laparoscopique.</i>	37
<i>Figure 6 – Mise en saillance de l'endroit à regarder dans l'étude de Vine et al. (2012).</i>	39
<i>Figure 7. Carte de chaleur des enfants sains (a) et vidéo avec le voile de redirection du regard (b) (Wang et al., 2015).</i>	41
<i>Figure 8 – Graphique présentant la modélisation proposée du comportement oculaire comprenant 5 caractéristiques (vitesse, fréquence, pertinence, structure et flexibilité).</i>	57
<i>Figure 9 - Exemple de situation dans laquelle un post-it vient cacher un instrument</i>	67
<i>Figure 10. Architecture en composants de l'outil permettant de produire des notifications en temps réel sur la base de l'analyse du comportement oculaire.</i>	71
<i>Figure 11 – Les types de feedbacks audios implémentés dans la première version du PilotGazeTrainer</i>	76
<i>Figure 12 – Illustration des différentes notifications visuelles qui peuvent être produites par le PiGaT.</i>	77
<i>Figure 13 – Captures d'écran illustrant la manière de définir des zones d'intérêt sur le PilotGazeTrainer.</i>	78

Figure 14. Exemple de définition de zones d'intérêt.....	79
Figure 15. Fonctionnalité et traitement séquentiel d'un scénario d'apprentissage du PiGaT comprenant 2 règles comportementales.....	81
Figure 16 - Photographie du Cirrus SR20 devant la tour de contrôle de la BA701 à Salon-de-Provence.....	93
Figure 17 – Photographies du simulateur du Cirrus SR20 en cours de conception, sous la supervision d'instructeurs de l'Armée de l'air.....	93
Figure 18 - Typologie des simulations (Eyrolle et al. 1996) ainsi que le positionnement des micromondes dans cette dernière.....	96
Figure 19 – Capture d'écran du micromonde Space Fortress.....	100
Figure 20 – Le micromonde NASA-MATB-II.....	100
Figure 21 - Photographie du micromonde Laby (Imbert, 2014).....	101
Figure 22 - Photo du simulateur SR20, avec la visualisation extérieure pour chercher les dangers extérieurs et le cockpit pour vérifier les paramètres de vol.....	102
Figure 23 - Capture d'écran du Micromonde AFT annoté.....	103
Figure 24 – Différents eye trackers fixes et mobiles.....	109
Figure 25 – Captures d'écran présentant le micromonde AFT augmenté de la notification produite par le PilotGazeTrainer dans le cadre du scénario des « 2secondes».....	111
Figure 26 – Photographie du simulateur avec la description des deux zones d'intérêt principales.....	112
Figure 27 - Photographie du simulateur Cirrus SR20 utilisé pour cette expérimentation.....	115
Figure 28 - Proportion de temps passé à regarder à l'extérieur du cockpit pour les trois groupes expérimentaux (Contrôle, Sonore, Visuel).....	117
Figure 29 – Fréquence de “violation” de la règle comportementale des “2 secondes” par minute pour les groupes Expérimentaux (i.e. Contrôle, Sonore, Visuel).....	118
Figure 30. Dispositif mis en œuvre pour permettre l'éducation du comportement oculaire.....	119
Figure 31. Notification reçue durant l'entraînement par les participants du groupe Full (à droite) à chaque fois que ces derniers passaient plus de 2 secondes d'affilée à regarder la tâche de monitoring.....	121
Figure 32 - Graphiques présentant, pour le groupe contrôle uniquement, la fréquence de fixation (le nombre de fixations par minute) durant le pré-test, le post-test et le test de rétention.....	123
Figure 33 - Graphiques présentant, pour le groupe contrôle uniquement, la durée moyenne de ces fixations en millisecondes durant le pré-test, le post-test et le test de rétention.....	124
Figure 34 - Graphique présentant le score à la tâche de monitoring obtenue par les participants, sans distinction de groupe, lors du pré-test, post-test et test de rétention.....	125
Figure 35 - Graphique présentant la performance à la tâche de targetting (i.e. pourcentage de bonnes réponses) obtenue par les participants, sans distinction de groupe, lors du pré-test, post-test et test de rétention.....	126
Figure 36. Graphique présentant la proportion de temps passé à regarder la tâche de targetting (%) avec les erreurs types, pour le groupe Contrôle (noir) et le groupe Full (rayé), durant les sessions de pré-test, post-test et test de rétention.....	127

Figure 37 – Graphiques de différents profils de transferts de connaissances/compétences (vanLegen & Chi, 2012).	137
Figure 38 – Photographie d’une participante réalisant cette expérimentation.	141
Figure 39 - A gauche, capture d’écran du micromonde AFT..	141
Figure 40 - Schéma du protocole expérimental en 5 phases réparties sur 2 jours.	142
Figure 41 - Photographie d’un participant en train de réaliser le tutoriel du micromonde AFT.	143
Figure 42 – Graphique présentant le pourcentage de temps passé à regarder la tâche de targetting (recherche visuelle) lors des trois tests sur la configuration ID2 du micromonde AFT (i.e. pré-test ID2, post-test ID2, test de rétention ID2) pour les groupes SimpleTraining (bleu) et Fulltraining (vert).....	146
Figure 43 – Graphique présentant la performance globale à l’AFT lors des trois premiers tests sur la configuration ID2 du micromonde AFT (i.e. pré-test ID2, post-test ID2, test de rétention ID2) pour les groupes SimpleTraining et Fulltraining regroupés.....	147
Figure 44 – Graphique présentant la performance globale à l’AFT pour les groupes contrôle (rouge), SimpleTraining (bleu) et FullTraining (vert) obtenu durant lors du pré-test ID3, post-test ID3 et test de transfert ID3+.....	149
Figure 45 - Graphique présentant le pourcentage de temps passé à regarder la tâche de targetting (recherche visuelle) lors des tests sur les nouvelles configurations du micromonde AFT (i.e. pré-test ID3, post-test ID3, transfert ID3+) pour les groupes SimpleTraining (bleu) et Fulltraining (vert)..	150
Figure 46 – Graphique présentant l’évolution de la fréquence de fixation (fixations / minute) au cours des différents tests sur les configurations ID3 et ID3+ de l’AFT pour le groupe SimpleTraining.....	151
Figure 47 - Graphique présentant l’évolution de la durée moyenne des fixations (millisecondes) au cours des différents tests sur les configurations ID3 et ID3+ de l’AFT pour le groupe SimpleTraining.....	152
Figure 48 – Graphique présentant la performance globale à l’AFT des trois groupes expérimentaux lors de la seconde période d’apprentissage (pré-test et post-Test).....	154
Figure 49 – Photographie d’un cadet-pilote (fin de la phase 1 de la formation de pilotage de l’Armée de l’air) en train de participer à cette expérimentation, aux commandes du simulateur de Cirrus SR20 et équipé de l’eye tracker Pertech®.....	159
Figure 50 - Graphique affichant l’inclinaison de l’avion sur le temps d’un virage par la gauche réalisé par un pilote-expert durant cette expérimentation.....	162
Figure 51 – Photographie d’un Capitaine de l’Armée de l’air en train de réaliser cette expérimentation.	164
Figure 52 – Zones d’intérêt définies pour le cockpit à l’intérieur du PFD.....	166
Figure 53 - Graphique présentant l’erreur moyenne (RMS) d’altitude obtenue lors de la réalisation des virages en pieds (ft) pour les différents groupes de pilotes de l’Armée de l’air française répartis en fonction de leur expérience.	167
Figure 54 - Graphique illustrant l’erreur de vitesse en nœuds (kt) pour les différents groupes de pilotes durant les virages.....	168
Figure 55 – Graphique montrant l’erreur d’inclinaison moyenne en degré (°) par rapport à la consigne des 30° d’inclinaison pour les trois groupes expérimentaux.	169

<i>Figure 56 - Graphique affichant l'erreur signée de cap en degré relatif au cap d'arrêt (°) pour les trois groupes expérimentaux.....</i>	<i>170</i>
<i>Figure 57 - Graphique présentant le nombre de fixations par minute durant la réalisation de virages à 30° d'inclinaison pour les trois groupes expérimentaux correspondant à des pilotes de l'Armée de l'air à différents moments de la formation de pilotage.</i>	<i>171</i>
<i>Figure 58 – Cycle de création-évaluation-compréhension, résumant les objectifs de l'ingénierie des facteurs humains (Lee, Wickens & Boyle, 2017).....</i>	<i>185</i>
<i>Figure 59 – Photographie du nouveau simulateur du Centre de Formation Aéronautique Militaire Initial (CFAMI) encore en conception.</i>	<i>186</i>
<i>Figure 60 – Capture d'écran de l'interface utilisateur permettant de définir facilement le comportement déclencheur d'une règle comportementales du PilotGazeTrainer.</i>	<i>203</i>
<i>Figure 61 – Capture d'écran de l'interface utilisateur permettant de définir les notifications à produire lors du déclenchement d'une règle (i.e. identification d'un comportement déclencheur)..</i>	<i>203</i>

Annexes

Annexe 1

Interfaces utilisateur du PiGaT pour la création de scénarios d'apprentissage (Comportement déclencheur et notifications à produire)

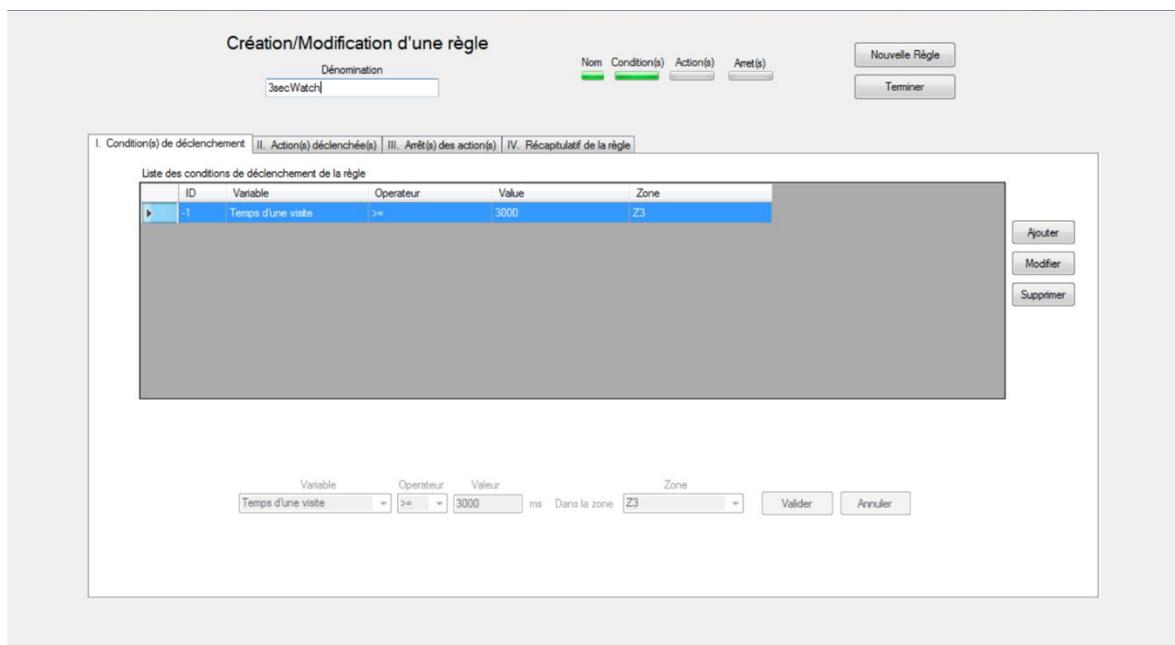


Figure 60 – Capture d'écran de l'interface utilisateur permettant de définir facilement le comportement déclencheur d'une règle comportementales du PilotGazeTrainer. Cette définition se fait par l'ajout de conditions de déclenchement associant une des variables d'analyse du comportement oculaire, un opérateur (i.e. <, >, >=, <=, =) et une valeur-seuil.

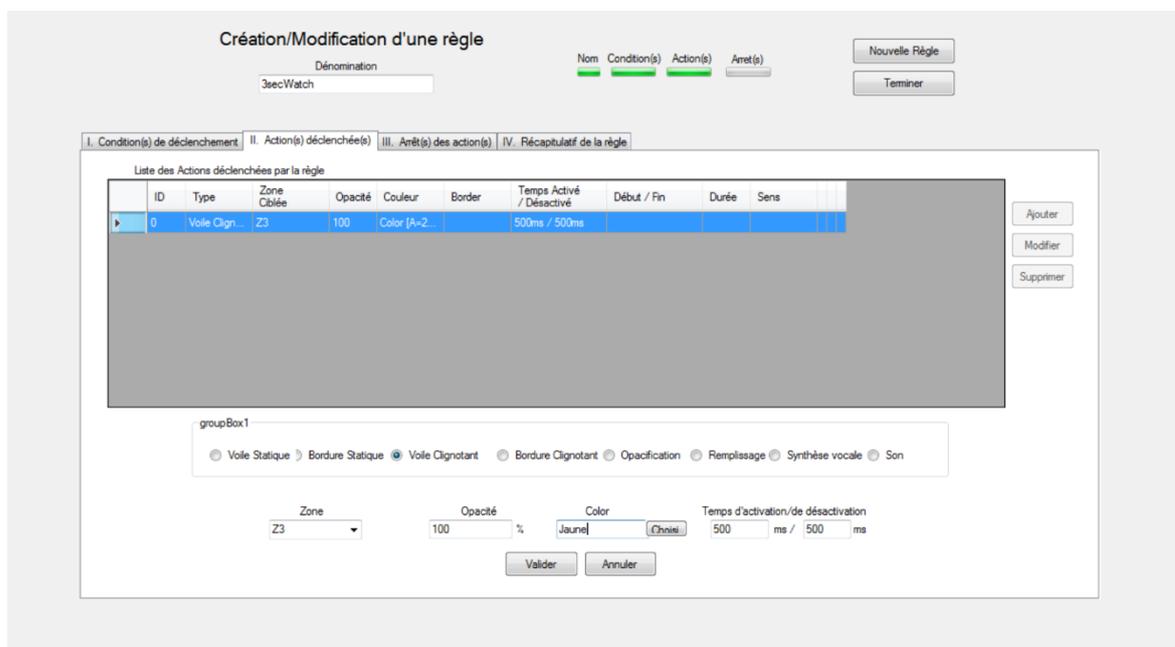


Figure 61 – Capture d'écran de l'interface utilisateur permettant de définir les notifications à produire lors du déclenchement d'une règle (i.e. identification d'un comportement déclencheur). Cette interface propose de choisir parmi les différents types de notifications possibles, et propose des champs à renseigner en fonction.

Annexe 2

Algorithme de découpe des virages

Nous avons traduit les caractéristiques des différentes sous-phases des virages de manière algorithmique en travaillant principalement sur la vitesse de l'inclinaison en degré par seconde ($^{\circ}/s$). Nous avons mesuré cette vitesse d'inclinaison toutes les 500ms. Nous avons considéré que l'inclinaison de l'avion était stable lorsque 3 mesures consécutives affichaient une vitesse d'inclinaison inférieure à $0,5^{\circ}/s$. Les degrés d'inclinaison étaient calculés en positif lorsque l'avion était incliné par la droite et en négatif lorsque l'avion était incliné par la gauche. La description de l'algorithme pour un virage par la gauche peut être décrit comme suit :

Nous considérons l'avion en vol en palier rectiligne stabilisé, c'est-à-dire avec une inclinaison et une vitesse d'inclinaison initiale respectivement d'environ 0° et $0^{\circ}/s$.

La phase de mise en virage démarre lorsque le pilote incline l'avion (vers la gauche pour cet exemple), soit, lorsque trois mesures consécutives de la vitesse d'inclinaison dépassent les $-0,5^{\circ}/s$ ($[-\infty ; -0,5]$). Elle se fini lorsque, proche des -30° d'inclinaison, cette inclinaison est stabilisée ou corrigée, en d'autres termes, lorsque trois mesures consécutives de la vitesse d'inclinaison affichent en dessous des $-0,5^{\circ}/s$ ($[-0,5 ; +\infty]$).

La deuxième phase (corps du virage) commence au moment où la première se termine et elle-même se termine lorsque l'avion commence à être incliné dans l'autre sens : lorsque trois mesures consécutives de la vitesse d'inclinaison dépassent les $+0,5^{\circ}/s$ ($[+0,5 ; +\infty]$).

La phase de sortie du virage commence alors et se termine lorsque l'inclinaison de l'avion est stabilisée ou corrigée aux alentours de l'inclinaison nulle. Cela correspond donc au moment où, proches des 0° d'inclinaison, trois mesures consécutives de la vitesse d'inclinaison repasse en dessous des $+0,5^{\circ}/s$ ($[-\infty ; +0,5]$).

La dernière phase de stabilisation correspond aux six secondes suivant ce moment-là.

Résumé

Une des difficultés fréquemment rapportées par les instructeurs-pilotes et les moniteurs-simulateurs de l'Armée de l'air concerne l'enseignement du « bon » comportement oculaire chez les élèves-pilotes en début de formation. Un « bon » comportement oculaire permet généralement de visionner rapidement et régulièrement un ensemble d'instruments du cockpit tout en surveillant l'environnement extérieur. Or, il est fréquent de voir les jeunes élèves-pilotes rester focalisés de longues secondes à l'intérieur du cockpit au détriment notamment, de la surveillance du ciel (*i.e.* voir et éviter les dangers extérieurs) Cette thèse s'intéresse à la manière d'**optimiser l'apprentissage du pilotage par l'amélioration de l'éducation du comportement oculaire**. Dans divers domaines (*e.g.*, médical, aéronautique), différentes méthodes d'éducation du comportement oculaire ont démontré leur efficacité quant à leur capacité à optimiser le temps d'apprentissage d'une tâche. En effet, à durée d'entraînement égale, les personnes qui ont bénéficié d'une éducation de leur comportement oculaire ont montré une supériorité dans la performance, l'efficacité ou la résistance au stress lors de la réalisation des tâches concernées. Toutefois, l'éducation du comportement oculaire n'a reçu que très peu de validation empirique dans le domaine de la formation au pilotage (Ziv, 2016). Notre analyse de la littérature révèle que cela pourrait être dû à des difficultés de mise en œuvre technique et méthodologique (*e.g.*, analyse en temps-réel du regard) inhérentes à la nature dynamique et complexe de l'activité de pilotage (Eyrolle, Mariné & Mailles, 1996). Cette thèse pluridisciplinaire (*i.e.*, Interactions Homme-Machine & Facteurs Humains) propose une nouvelle approche visant à essayer de dépasser ces limites. Dans le but d'éduquer le comportement oculaire des élèves-pilotes, nous avons tout d'abord cherché à modéliser les caractéristiques du comportement oculaire à adopter. Puis nous avons conçu, développé et validé expérimentalement un premier outil spécifique, le *PilotGazeTrainer* (un logiciel informatique), permettant de mettre en œuvre une nouvelle méthode d'éducation du comportement oculaire. Cette méthode est basée sur deux principes essentiels : l'analyse permanente du regard du participant, et l'affichage en temps-réel de feedbacks visuels ou sonores en fonction des résultats de l'analyse oculaire. Afin d'évaluer cette nouvelle méthode, nous avons réalisé plusieurs expérimentations sur un simulateur de vol. Nous avons également développé un micromonde de pilotage, l'*AbstractFlyingTask*, dans le but de pouvoir aussi étudier notre méthode sur une population de non-pilote. Les premiers résultats montrent que notre méthode permet, en très peu de temps, **une modification durable du comportement oculaire**. Ces résultats comportementaux ont également révélé le potentiel des outils développés – le micromonde *AbstractFlyingTask* et le *PilotGazeTrainer* – pour éduquer le comportement oculaire dans des domaines dont la nature de l'activité est reconnue comme dynamique et complexe (*e.g.* conduite automobile).

Abstract

French military pilot instructors generally state that the teaching of the "right" ocular behavior represents a difficulty at the beginning of the piloting training. This kind of ocular behavior allows to quickly and regularly view a set of cockpit instruments while monitoring the outside environment. However, instructors often observe student pilots remain concentrated for long seconds inside the cockpit at the expense of scanning out of the window (*e.g.*, to see and avoid mid-air collisions). This thesis focuses on how to optimize the learning of piloting by improving the education of the ocular behavior. In several fields (*e.g.*, medical, aeronautics), different methods of educating the ocular behavior have demonstrated their effectiveness in their ability to optimize the learning of a task. Indeed, with the same training time, people who have benefited from an education of their ocular behavior have shown a superiority in performance, efficiency or resistance to stress when performing the task involved. However, the education of ocular behavior has received few empirical validations in the field of piloting training (Ziv, 2016). Our analysis of the literature reveals that this may be due to difficulties in the technical and methodological implementation (*e.g.*, real-time analysis of the gaze location) inherent in the dynamic and complex nature of the piloting situation (Eyrolle, Mariné & Mailles, 1996). This multidisciplinary thesis (*i.e.*, Human-Computer Interactions & Human Factors) proposes a new approach to try to go beyond these limits. In order to educate the ocular behavior of the pilot students, we first modeled the characteristics of the ocular behavior to be adopted. Then we designed, developed and validated experimentally a first specific tool, the *PilotGazeTrainer* (a software), which allows the implementation of a new method of education of the ocular behavior. This method is based on two essential principles: the permanent analysis of the participant's ocular behavior, and the production in real-time of visual or sound feedbacks based on the results of this analysis. In order to evaluate this new method, we performed several experiments on a flight simulator. We also developed a piloting microworld, to assess our method on a non-pilot population as a precautionary measure. The first results show that our method allows a lasting modification of the ocular behavior in a very short intervention time. These behavioral results also revealed the potential of the developed tools - the *AbstractFlyingTask* microworld and the *PilotGazeTrainer* - to educate ocular behavior in many dynamic and complexe situations (*e.g.* driving).